

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Martin Vrbanc

Zagreb, 2018

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Zoran Kožuh, dipl. ing.

Student:

Martin Vrbanc

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Zoranu Kožuhu i prof. dr. sc. Ivici Garašiću na podršci i savjetima tijekom izrade završnog rada.

Zahvaljujem se dr. sc. Matiji Bušiću na stručnom vođenju i pomoći tijekom izrade završnog rada, te hvala svim djelatnicima s katedre za zavarene konstrukcije i katedre za zaštitu materijala , koji su omogućili izvedbu eksperimentalnog dijela rada.

Veliko hvala obitelji na strpljenju i podršci tijekom studija.

Martin Vrbanc



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MARTIN VRBANC**

Mat. br.: 0035198146

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

ZAVARIVANJE RAZNORODNIH ČELIKA

Naslov rada na
engleskom jeziku:

WELDING OF DISSIMILAR STEELS

Opis zadatka:

U uvodnom dijelu rada potrebno je analizirati problematiku zavarivanja raznorodnih čelika tj. visokolegiranih nehrđajućih čelika i nelegiranih/niskolegiranih čelika. Posebno proučiti metalurške aspekte ovakvih zavarenih spojeva te način određivanja dodatnog materijala u ovisnosti o kombinaciji čelika i vrsti postupka zavarivanja. Opisati primjere korištenja raznorodnih zavarenih spojeva na konstrukcijama u praksi kao i tipične pogreške koje se pojavljuju.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je na odgovarajućim uzorcima odrediti parametre zavarivanja i vrstu dodatnog materijala za spoj čelika AISI 304 i S235. Na zavarenim spojevima potrebno je provesti ispitivanja mehaničkih svojstava kao i mikrostrukturnu analizu prema zahtjevima norme HRN EN ISO 15614-1. Donijeti zaključke o prikladnosti definirane tehnologije zavarivanja kao i uputu za primjenu iste u stvarnoj proizvodnji.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh

Rok predaje rada:

1. rok: 23. veljače 2018.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.

3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.

2. rok (izvanredni): 2.7.
2018.

3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS KRATICA	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. NELEGIRANI ČELICI	2
2.1. Karakteristike nelegiranih čelika	2
2.2. Zavarljivost nelegiranih čelika.....	3
3. VISOKOLEGIRANI ČELICI	4
3.1. Austenitni čelici	5
3.1.1. Zavarljivost austenitnih čelika	6
3.2. Feritni čelici	7
3.2.1. Zavarljivost feritnih čelika.....	8
3.3. Martenzitni čelici	9
3.3.1. Zavarljivost martenzitnih čelika	11
4. ZAVARIVANJE RAZNORODNIH ČELIKA	12
4.1. Zavarljivost raznorodnih čelika	14
4.1.1. Stupanj protaljivanja	14
4.1.2. Izbor dodatnog materijala	15
4.1.3. Izbor postupka zavarivanja	16
4.1.4. Difuzijski procesi	17
4.1.5. Strukturna heterogenost i primjena Schaefflerovog dijagrama.....	18
5. ZAOSTALA NAPREZANJA I DEFORMACIJE ZAVARENIH SPOJEVA	23
6. MIG/MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA	25
6.1. Prednosti i nedostaci MIG/MAG postupka zavarivanja	25
6.2. Oprema za MIG/MAG postupak zavarivanja	26
6.3. Parametri MIG/MAG postupka zavarivanja	27
6.4. Načini prijenosa metala pri MIG/MAG postupku zavarivanja.....	28
6.4.1. Prijenos materijala kratkim spojem	28
6.4.2. Prijenos metala prijelaznim lukom	28
6.4.3. Prijenos metala štrcajućim lukom.....	29
6.4.4. Prijenos metala impulsnim lukom – kontrolirani prijenos štrcajućim lukom.....	29
7. EKSPERIMENTALNI RAD	30
7.1. Materijali korišteni za izradu eksperimentalnog dijela rada	30
7.1.1. Karakteristike osnovnog metala-nelegirani čelik.....	30
7.1.2. Karakteristike osnovnog metala-visokolegirani čelik.....	30

7.1.3. Dodatni materijal-metal zavara	31
7.2. Priprema uzoraka za zavarivanje	31
7.3. Zavarivanje uzoraka MIG postupkom	34
7.4. Vizualna kontrola uzoraka	37
7.5. Kontrola bez razaranja- ispitivanje penetrantima	38
7.6. Makro izbrusci presjeka zavarenog spoja	40
7.6.1. Geometrija zavara	43
8. ZAKLJUČAK.....	46
9. LITERATURA	47

POPIS SLIKA

Slika 1.	Feritno-perlitna mikrostruktura nelegiranog konstrukcijskog čelika a) čelik s 0,1%C, b) čelik s 0,25 % C	2
Slika 2.	Karakteristične mikrostrukture pojedinih gupa visokolegiranih čelika	4
Slika 3.	Dio ispušnog sustava automobila izrađen od feritnog čelika	8
Slika 4.	Podjela zavarenih konstrukcija od raznorodnih čelika	13
Slika 5.	Utjecaj sadržaja kroma u ugljičnom čeliku na širinu razugljičenog sloja	18
Slika 6.	Schaeffler-ov dijagram dopunjen Delongom i Bystranom.....	19
Slika 7.	Prikaz primjene Schaefflerovog strukturnog dijagrama	21
Slika 8.	WRC dijagram	22
Slika 9.	Faktor f, ovisan o postotku Fe u metalu zavara.....	22
Slika 10.	Shema MIG/MAG postupka zavarivanja	25
Slika 11.	Oprema za MIG zavarivanje.....	27
Slika 12.	Dimenzije uzoraka	32
Slika 13.	Naziv i proizvođač uređaja za plazma rezanje.....	32
Slika 14.	Plazma rezanje.....	33
Slika 15.	Izbrušeni i očišćeni uzorci.....	33
Slika 16.	Čišćenje uzoraka četkom.....	37
Slika 17.	Uzorak 1 nakon zavarivanja.....	37
Slika 18.	Uzorak 2 nakon zavarivanja.....	38
Slika 19.	Čistač, penetrant i razvijač.....	38
Slika 20.	Površine zavarenih spojeva nakon što se razvijač osušio.....	39
Slika 21.	Uzorci nakon što se razvijač osušio.....	39
Slika 22.	Uzorci nakon što se razvijač osušio.....	40
Slika 23.	Oprema za elektrolitičko ispitivanje.....	41
Slika 24.	Makro izbrusak presjeka zavarenog spoja, uzorak 1.....	42
Slika 25.	Makro izbrusak presjeka zavarenog spoja, uzorak 2.....	42
Slika 26.	Visine i širine zavara uzorka 1.....	43
Slika 27.	Visine i širine zavara uzorka 2.....	44
Slika 28.	Površine zavara uzorka 1.....	44
Slika 29.	Površine zavara uzorka 2.....	44

POPIS TABLICA

Tablica 1. Temperatura predgrijavanja (To) ovisna o sadržaju ugljika	Error! Bookmark not defined.
Tablica 2. Fizikalna svojstva različitih grupa čelika	5
Tablica 3. Utjecaj pojedinih elemenata na austenitni čelik.....	6
Tablica 4. Popis standardnih vrsta martenzitnih čelika prema normi HRN-EN 1099-1:2007.....	10
Tablica 5. Prikaz dodatnih materijala za zavarivanje VAC s nelegiranim čelicima MIG postupkom.....	16
Tablica 6. Stupnjevi mješanja ovisno o postupku zavarivanja.....	16
Tablica 7. Svojstva različitih vrsta čelika	24
Tablica 8. Kemijski sastav čelika S235JR.....	30
Tablica 9. Kemijski sastav čelika X5 CrNi 18-10.....	30
Tablica 10. Mehanička svojstva dodatnog materijala.....	31
Tablica 11. Kemijski sastav dodatog materijala.....	31
Tablica 12. Specifikacija zavarivanja uzorka 1.....	35
Tablica 13. Specifikacija zavarivanja uzorka 2.....	36
Tablica 14. Izmjerene veličine uzorka 1.....	45
Tablica 15. Izmjerene veličine uzorka 2.....	45

POPIS KRATICA

Oznaka	Opis
MIG	Metal inert gas
MAG	Metal active gas
C	ugljik
P	fosfor
Cu	bakar
S	sumpor
Al	alumiij
Titan	titan
Mn	mangan
N	dušik
Ni	nikal
ZUT	zona utjecaja topline
A	austenit
F	ferit
M	martenzit
VAC	visokoaustenitni čelik

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
I	A	Jakost struje zavarivanja
U	V	Napon zavarivanja
v_z	cm/s	Brzina žice
v_z	cm/s	Brzina zavarivanja
T_o	°C	Temperatura predgrijavanja
α	1/K	Koeficijent linearnog istezanja
λ	W/mK	Koeficijent toplinske provodljivosti
E	N/mm ²	Modul elastičnosti
Re	N/mm ²	Granica razvlačenja
Rm	N/mm ²	Vlačna čvrstoća

SAŽETAK

Tema ovog završnog rada je analiza zavarivanja raznorodnih čelika MIG/MAG postupkom. Rad se dijeli na teorijski i eksperimentalni dio.

U teorijskom dijelu navede su opće značajke MIG/MAG postupka , karakteristike i zavarivanje nelegiranih i visokolegiranih čelika. Potom je opisano samo zavarivanje raznorodnih spojeva te problemi koji nastaju prilikom njihovog zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu je provedeno zavarivanje MIG postupkom , nelegiranog čelika i visokolegiranog čelika.

Ključne riječi: zavarivanje;raznorodni čelici, MIG

SUMMARY

The topic of this work is the analysis of welding dissimilar steel (structural steel and stainless steel) by the MIG / MAG process. The work is divided into a theoretical and experimental part. The theoretical part mentions the general features of the MIG process, characteristics and welding of non-alloy and high alloy steels. After that are described welding technology and problems which occurs while welding dissimilar steels.

In the experimental part, unalloyed steel and high alloyed steel was welded by MIG.

Key words: welding, various steels, MIG

1. UVOD

U današnje vrijeme zavarivanje igra veliku ulogu u mnogim industrijskim granama , te se prilikom izrade zavarene konstrukcije treba paziti na mnogo faktora kao što su : sigurnost konstrukcije , minimalni troškovi i minimalan utrošak energije te utjecaj na okoliš.

Razvojem pojedinih industrija kao što su kemijska , naftna , off-shore i nuklearna došlo je do istraživanja zavarivanja raznorodnih čelika.

Konstrukcije u tim industrijama izložene se različitim opterećenjima i naprezanjima , te djelovanju agresivnog korozijskog okoliša. Potrebne su različite kombinacije čelika kako bi se zadovoljili uvjeti eksploatacije.

Zbog različitih svojstava čelika potrebno je prije zavarivanje kvalitetno odabrati postupak i parametre zavarivanje te režime predgrijavanja i hlađenja , jer može doći do difuzije ugljika i nastanka zaostalih naprezanja što smanjuje mehanička svojstva spoja, te na kraju pojave pukotina. Ako se zavarivanje kvalitetno provede dolazi do mješanja svojstava čelika.

U eksperimentalnom dijelu provedeno je MIG zavarivanje čelika AISI 304 i S235 , izvršena je vizualna kontrola, ispitivanje penetrantima te su analizirani izbrusci izrezani iz zavarenih uzoraka, prema normi HRN EN ISO 15614-1.

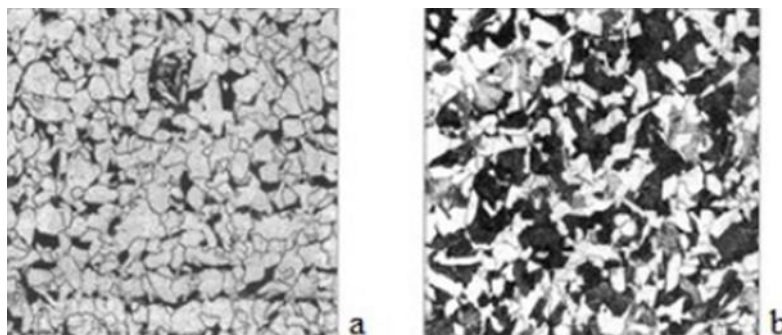
2. NELEGIRANI ČELICI

2.1. Karakteristike nelegiranih čelika

Ugljik je najvažniji element u sastavu nelegiranih čelika te je njegov sadržaj od 0,1 do 0,6 %. Sadržaj ostalih elemenata za ovu skupinu čelika kreće se približno do: 0,55 %Si, 1,65 %Mn, 0,3 %Al, 0,1 %Ti, 0,035 %S, 0,035 %P, 0,4%Cu. [1]

Povećanjem sadržaja ugljika raste tvrdoća, granica razvlačenja i vlačna čvrstoća, ali se smanjuje istezljivost, udarni rad loma te opada sposobnost čelika za plastičnu deformaciju i zavarljivost, a raste zakaljivost.

Nelegirani konstrukcijski čelici imaju feritno – perlitnu strukturu, a zrno će biti sitnije ako je čelik nakon toplog oblikovanja normaliziran. Ova sitnozrnatost još se poboljšava posebnim smirivanjem uz dodatak aluminija koji se spaja s dušikom u aluminijev nitrid (AlN) i tako osigurava usitnjenje zrna, odnosno sprječava novi njegov rast pri idućim ugrijavanjima, npr. pri zavarivanju. [2] Na slici 1. prikazana je feritno – perlitna mikrostruktura nelegiranog konstrukcijskog čelika sa različitim sadržajem ugljika.



Slika 1. Feritno – perlitna mikrostruktura nelegiranog konstrukcijskog čelika a) čelik s 0,1 %C; b) čelik s 0,25 %C [3]

2.2. Zavarljivost nelegiranih čelika

Problemi koji se mogu javiti prilikom zavarivanja nelegiranih čelika su : pukotine, krhkost , zaostala naprezanja i poroznost. Osim uvjeta prilikom zavarivanja na moguće probleme utječe način izrade čelika u čeličani. [1]

Mogu se proizvesti kao:

-Neumireni čelici su najpovoljniji na tržištu, bez dezoksidacije, imaju sklonost pojavi pukotina, poroznosti, starenja, krhkosti te su lošije zavarljivi. Nemaju jednoličnu mikrostrukturu po presjeku, sadrže plinske mjehuriće te su im izražene segregacije. Nije ih preporučljivo koristiti za zahtjevnije zavarene konstrukcije.

-Umireni čelici u toku proizvodnje tretirani su dezoksidantima (Si, Mn), imaju homogenu mikrostrukturu, bolja mehanička svojstva i zavarljivost, ne sadrže plinske mjehuriće i nije izražena segregacija. [2]

- Posebno umireni čelici u procesu dezoksidacije osim silicijem i manganom tretirani su i siliko-kalcijem (CaSi) i aluminijem koji veže preostali kisik u Al_2O_3 i dušik u AlN. Rezultat je čelik s vrlo niskim masenim udjelom nečistoća, velike žilavosti i male osjetljivosti na krhki lom. Sitne čestice AlN povisuju čvrstoću i žilavost, a omogućuju postizanje sitnog zrna.

Načini poboljšanja kvalitete zavarenih spojeva su: predgrijavanje osnovnog materijala, zavarivanje s većim unosom topline, primjena bazičnih elektroda, optimalno oblikovanje konstrukcije te popuštanje zaostalih naprezanja nakon zavarivanja , zavarivanje odgovarajućim dodatnim materijalom kao i odabir osnovnog materijala sa što manjim udjelom sumpora i ostalih nečistoća, jer je sumpor glavni uzročnik pojave toplih pukotina. [2]

Predgrijavanjem čelika se postiže smanjenje brzine hlađenja nakon zavarivanja, smanjuju se zaostala naprezanja te se eliminira difuzijski vodik. Temperatura predgrijavanja uvelike ovisi o udjelu ugljika u materijalu. U tablici 1. su prikazane temperature predgrijavanja ovisne o sadržaju ugljika u čeliku. [3]

Tablica 1. T_0 ovisne o sadržaju ugljika u čeliku [3]

Sadržaj ugljika, mas. %	Temperatura predgrijavanja, T_0 °C
0,2-0,3	100-150
0,3-0,45	150-275
0,45-0,8	275-425

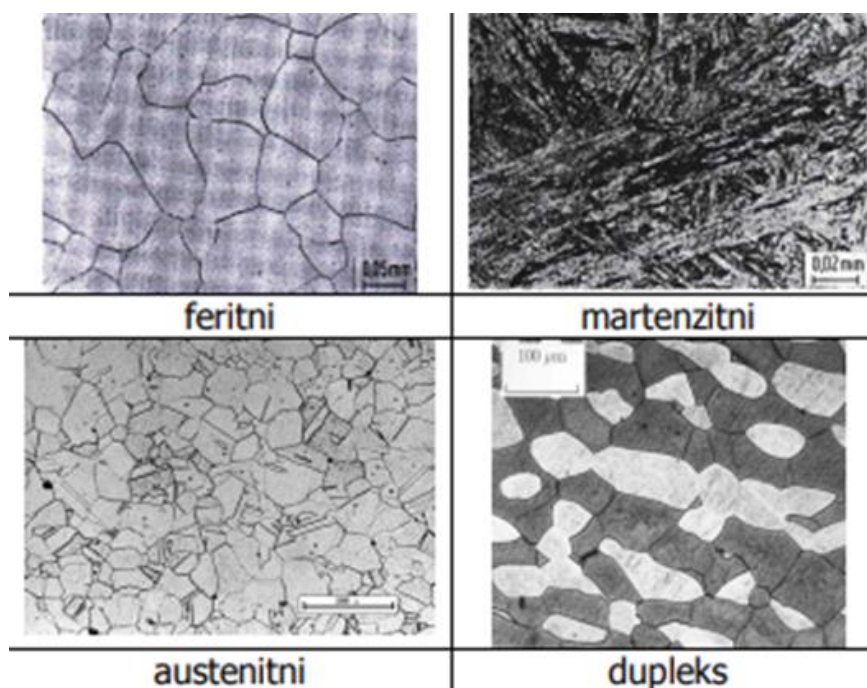
3. VISOKOLEGIRANI ČELICI

Visokolegirani čelici počeli su se koristiti početkom 20. stoljeća, te su u konstantnom razvoju sve do danas, te njihova proizvodnja i upotreba raste. Najveći porast su zabilježili u zadnjih 40 godina zbog unapređenja tehnologije proizvodnje.

Obilježava ih minimalni udio od 5% legirajućih elemenata poput kroma, nikla, molibdena, titana, dušika, kojima se mijenja struktura, ili postiže bolja otpornost na koroziju, poboljšava obradivost, čvrstoća ili žilavost na nižim temperaturama. [4]

Visokolegirani čelici se dijele na 4 osnovne skupine, pri čemu je podjela izvršena na osnovi mikrostrukture. Tako postoje martenzitni, feritni, austenitni i dupleks (austenitno – feritni) visokolegirani čelici. Dodatna podjela se može napraviti uzimajući u obzir mogućnost očvršćivanja u tom slučaju postoje i martenzitno-feritni čelici.

Na slici 2. su prikazane mikrostrukture različitih grupa visokolegiranih čelika[4]



Slika 2. Karakteristične mikrostrukture pojedinih grupa visokolegiranih čelika[4]

Za zavarivanje visokolegiranih čelika vrlo su važna njihova fizikalna svojstva, koja imaju utjecaj na ponašanje materijala prilikom zavarivanja, neka od njih su: koeficijent toplinske provodljivosti, modul elastičnosti, električni otpor. U tablici 2. su prikazana fizikalna svojstva glavnih grupa visokolegiranih čelika te nelegiranih čelika. [5]

Tablica 2. Fizikalna svojstva različitih grupa čelika [5]

Vrsta čelika	Fizikalna svojstva			
	α 10 ⁻⁶ x K ⁻¹ (100 °C – 500 °C)	λ W/(m x K) (20 °C)	Ω Ω x mm ² /m (20 °C)	E kN/mm ² (20 °C)
feritni	10,5-12	29	0,6	210
martenzitni	10,5-12	30	0,6	210
austenitni	16-18	15	0,73	200
austenitno-feritni (duplex)	12,5-13(do 300 °C)	14	0,79	206
nelegirani čelici	13	47	0,15	205

3.1. Austenitni čelici

Austenitni čelici zbog svoje dobre korozijske postojanosti, dobre obradljivosti, dobre zavarljivosti, mehaničkih svojstava te estetskih karakteristika najčešće su korištena vrsta visokolegiranih čelika. Upotrebljavaju se u skoro svim granama industrije.

Austenitni čelici uglavnom sadrže 0,02 % – 0,15 % C, 15 % – 20 % Cr, 7 % – 20 % Ni, uz moguće dodavanje određene količine molibdena, titana, niobija, tantal, dušika.

Dodatkom nikla i dušika djeluje se na proširenje područja austenita te na snižavanje temperature početka stvaranja martenzita. Posjeduju visoku duktilnost te nisku čvrstoću, minimalna granica razvlačenja na sobnoj temperaturi iznosi oko 210 N/mm², što je jedan od njihovih velikih nedostataka i po tom svojstvu se mogu usporediti s nelegiranim čelicima.

Do temperature od 760 °C ne dolazi do smanjenja čvrstoće i opornosti na oksidaciju. Mogu se (značajno) očvrnuti hladnom deformacijom, pri čemu dolazi do smanjenja duktilnosti.

Dodavanjem Cr više od 18% općenito se povećava otpornost na koroziju, dok se molibden dodaje da se poveća otpornost na napetosnu i rupičastu koroziju, te nikal dodatno povećava otpornost prema napetosnoj koroziji.[5,6] U tablici 3. je prikazano kako pojedini legirni elementi utječu na austenitni čelik. [1]

Tablica 3. Utjecaj pojedinih legirnih elemenata na austenitni čelik [1]

Element	Tvori strukturu	Karakteristike
C	A	30 puta jače djeluje na stvaranje austenita nego Ni. Može stvarati Cr ₂₃ C ₆ i uzrokovati IKK.
Cr	F	Poboljšava otpornost koroziji i oksidaciji.
Ni	A	Poboljšava čvrstoću pri povišenim temperaturama i korozijsku otpornost.
N	A	30 puta jače djeluje na stvaranje austenita nego Ni. Povišuje čvrstoću i pomaže stvaranju ferita
Nb		Dodaje se čeliku min Nb $\geq 8 \times \%C$ da bi se vezao za ugljik i spriječio IKK. Tvorac finog zrna.
Mn	A	Sprječava vruće pukotine stvaranjem MnS.
Mo	F	Poboljšava čvrstoću pri povišenim temperaturama. Poboljšava antikorozivnost pri djelovanju reducirajućih medija
P,S,Fe	-	Olakšava OOČ, ali pogoršava zavarljivost i antikorozivnost.
Si	F	Poboljšava vatrootpornost (otpor oksidaciji). Dodaje se uvijek zbog dezoksidacije.
Ti	-	Dodaje se čeliku Ti $\geq 5 \times \%C$ da bi se vezao za ugljik i spriječio IKK. Tvorac sitnog zrna.

3.1.1. Zavarljivost austenitnih čelika

Austenitni čelici dobro su zavarljivi. No ako se ne poštuju tehnološki zahtjevi zavarivanja dolazi do problema koji se mogu podijeliti u 3 skupine. [5]

1. Korozijske pojave,
2. Tople pukotine,
3. Izlučivanje σ – faze.

Unatoč tome što imaju dobru korozijsku postojanost, prilikom zavarivanja može doći do osjetljivosti zavarenog spoja na koroziju u procjepu, rupičastu i interkristalnu.

Najveći problem predstavlja mogućnost senzibilizacije tj. precipitacije kromovih karbida u temperaturnom rasponu od 425-850°C što može dovesti do pojave interkristalne korozije.

Interkristalna korozija se može spriječiti:

1. Legiranjem elementima karbidotvorcima Nb, Ti, Ta,
2. Smanjenjem sadržaja ugljika,
3. Toplinskom obradom gašenja i
4. Malim unošenjem topline tijekom zavarivanja. [4,5]

Zavarljivost ovih konstrukcijskih materijala traži odgovarajuću tehnološku razinu i disciplinu, a treba voditi računa i o povećanoj sklonosti deformacijama. Naime, visoki koeficijent toplinske istezljivosti, te sniženi koeficijent toplinske vodljivosti, rezultiraju povećanom sklonošću k deformacijama kao posljedicu zavarivanja.

Skloni su pojavi toplih pukotina u metalu zavora, što se javlja s jedne strane kao posljedica nečistoća u materijalu, te uslijed izražene sklonosti deformacijama odnosno zaostalim naprezanjima. Problem je danas uglavnom riješen pravilnim odabirom dodatnih materijala (4-12% delta ferita) te samom tehnikom kao i ostalim uvjetima zavarivanja.

Sigma faza je tvrda, krhka, nemagnetična intermetalna faza koja nastaje pri povišenim i visokim temperaturama, te uzrokuje smanjenje istezljivosti i žilavosti. [1] [5]

Zahtjevi koji su preporučeni prilikom biranja tehnologije zavarivanja austenitnih čelika su:

- Izborom dodatnog materijala koji osigurava sadržaj δ – ferita čime se praktički otklanja opasnost od toplih pukotina,
- potrebno dobro očistiti i odmastiti površine prije zavarivanja,
- bitna vrsta i čistoća zaštitnih plinova te njihova mješavina,
- za tanke materijale nije potrebno predgrijavati, a za deblje je potrebno i to u temperaturnom rasponu od 100°C do 150°C,
- odabrati takve uvjete zavarivanja koji osiguravaju miješanje s osnovnim materijalom manjim od 35 %,
- primjenjivati dodatne materijale sa što nižim postotkom ugljika,
- čekić, četka moraju isključivo biti od nehrđajućeg Cr ili Cr-Ni čelika. [5]

3.2. Feritni čelici

Legure iz ove skupine sadrže uobičajeno 11 -17 %Cr, uz dodatak nekih drugih legiranih elemenata (npr. Mo, Si, Al, Ti ili Nb) ovisno o svojstvu koje se želi postići. Feritni nehrđajući čelici su feromagnetični i ne mogu očvrnuti postupcima toplinske obrade jer nemaju faznu pretvorbu. Njihove granice razvlačenja kreću se od 275-350 N/mm², a vlačna čvrstoća 415-585 N/mm². [5] Vlačna čvrstoća na povišenim temperaturama niža je nego kod austenitnih čelika. Prednost ove skupine čelika je otpornost na koroziju i oksidaciju, pa se tako koriste npr. u uvjetima izloženosti dušičnoj kiselini, u obradi voda, preradi hrane i arhitekturi. Primjenjuju se tamo gdje je otpornost na koroziju važnija od nego sama mehanička svojstva, vrste s nižim udjelom kroma koriste se za ispušne sustave u automobilima, one s višim udjelom kod ostale automobilske opreme, dok se skupine s najvišim udjelom kroma koriste u naftnoj, procesnoj i kemijskoj industriji gdje je korozivni utjecaj izrazito izražen. Feritni čelici su relativno skupi i teško obradljivi. [5]

3.2.1. Zavarljivost feritnih čelika

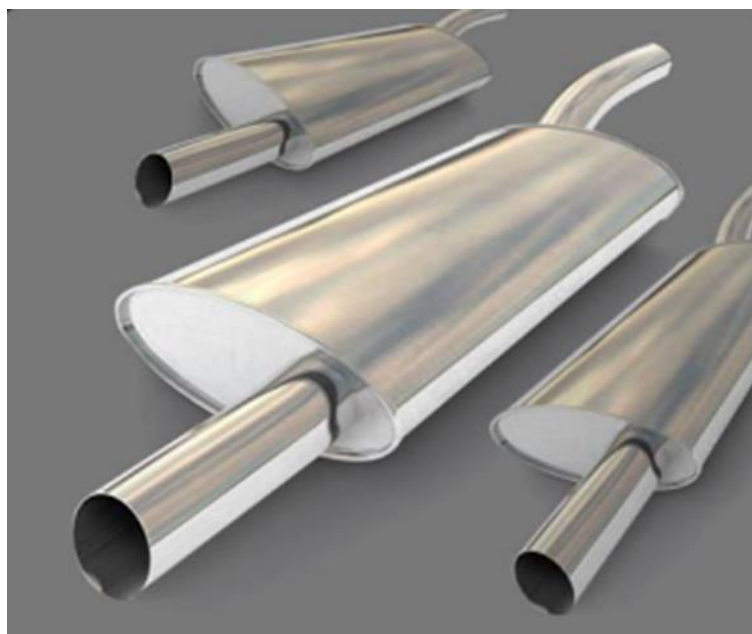
Zavarljivost feritnih nehrđajućih čelika je ograničena zbog izrazite sklonosti prema pogrubljenju zrna prilikom zavarivanja, iznad 600 °C počinje rast zrna što ima za posljedicu pad mehaničkih svojstava posebice žilavosti dok iznad 850°C zrna pogrube. To je posebice nepovoljno jer zbog nemogućnosti fazne transformacije, kasnije više nije moguć povratak toplinskom obradom u fino zrnatu mikrostrukturu.

Skлонost čelika pogrubljenju zrna može se smanjiti dodavanjem manje količine dušika u sastav čelika. Dodavanjem dušika u metal zavara, doći će do skrućivanja u sitno zrnatu strukturu. Osim toga, preporuča se zavarivanje s dodatnim materijalom austenitnog tipa, npr. 18/8 (18 % Cr, 8% Ni). [4,5]

Osim pogrubljenja zrna na većim temperaturama može doći do izlučivanja Cr po granicama zrna u zoni utjecaja topline što dovodi do pojave interkristalne korozije.

Ostale poteškoće koje mogu nastati prilikom zavarivanja su stvaranje σ – faze pri držanju materijala na temperaturi između 520°C do 850°C. σ – faza je intermetalni spoj kroma i željeza velike tvrdoće i krhkosti te slabe korozijske postojanosti, a pri dugotrajnom zagrijavanju na temperaturi između 400 °C i 540 °C, može doći do pojave tzv. “krhkosti 475”. [4,5]

Na slici 3. je prikazana primjena feritnog čelika za izradu dijela ispušnog sustava automobila. [7]



Slika 3. Dio ispušnog sustava automobila izrađen od feritnog čelika [7]

3.3. Martenzitni čelici

Martenzitni čelici imaju udio kroma od 13% - 18%, te udio ugljika 0,15 % do 1,2 % te mogu sadržavati i do 1,3 % molibdena i 2,5 % nikla. Žilavost im je veća što je udio ugljika manji. Martenzitna mikrostruktura se postiže alotropskom modifikacijom austenita. Otpornost na koroziju i tražena mehanička svojstva se postižu kaljenjem na zraku ili u ulju te naknadnim popuštanjem. [4]

Martenzitne čelike dijeli se u dvije skupine: [5]

1. Konstrukcijski (do $\approx 0,25$ % C, poboljšavaju se) i
2. Alatni čelici ($>0,3$ % C, nakon kaljenja se nisko popuštaju).

Kod konstrukcijskih se posebna pažnja usmjerava na otpornost prema koroziji koju dobivaju nakon poboljšavanja.

Kod alatnih čelika postoji dodatni zahtjev prema abrazijskom trošenju. Njihova korozijska postojanost je nešto niža zbog dvofazne mikrostrukture koju posjeduju (martenzit + karbidi). U tablici 4. popis je najčešće primjenjivanih martenzitnih čelika te njihov kemijski sastav prema normi HRN EN 10088-1:2007 [8]

[8] Tablica 4. Popis standardnih vrsta martenzitnih čelika prema normi HRN EN 10088-1:2007 [8]

Naziv čelika	Oznaka čelika	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Ostalo
X12Cr13	1.4006	0,08/0,15	1	1,5	0,04	0,02	-	11,5/13,5	-	0,75	-
X15Cr13	1.4024	0,12/0,17	1	1	0,04	0,02	-	12,0/14,0	-	-	-
X20Cr13	1.4021	0,16/0,25	1	1,5	0,04	0,02	-	12,0/14,0	-	-	-
X30Cr13	1.4028	0,26/0,35	1	1,5	0,04	0,02	-	12,0/14,0	-	-	-
X39Cr13	1.4031	0,36/0,42	1	1	0,04	0,02	-	12,5/14,5	-	-	-
X46Cr13	1.4034	0,43/0,50	1	1	0,04	0,02	-	12,5/14,5	-	-	-
X38CrMo14	1.4419	0,36/0,42	1	1	0,04	0,02	-	13,0/14,5	0,60/1,00	-	-
X55CrMo14	1.4110	0,48/0,60	1	1	0,04	0,02	-	13,0/15,0	0,50/0,80	-	V:0,15
X50CrMoV15	1.4116	0,45/0,55	1	1	0,04	0,02	-	14,0/15,0	0,50/0,80	-	V:0,1/0,2
X39CrMo17-1	1.4122	0,33/0,45	1	1,5	0,04	0,02	-	15,5/17,5	0,80/1,30	1	-
X3CrNiMo13-4	1.4313	0,05	0,7	1,5	0,04	0,02	≥0,02	12,0/14,0	0,30/0,70	3,5/4,5	-
X4CrNiMo16-5-1	1.4418	0,06	0,7	1,5	0,04	0,02	≥0,02	15,0/17,0	0,80/1,50	4,0/6,0	-

Imaju širok raspon vrijednosti čvrstoća i granica razvlačenja, tako je raspon granice razvlačenja od 290 N/mm² u žarenom do 1900 N/mm² u gašenom i popuštenom stanju.

Potrebno ih je popuštati kako bi se postigla tražena žilavost za uvjete eksploatacije.

Glavna im je karakteristika visoka tvrdoća, što je preduvjet za dobru otpornost na abrazijsko trošenje. Korozijska postojanost im je niža nego kod ostalih visokolegiranih čelika, zbog manjeg udjela kroma i ostalih legiranih elemenata, te se primjenjuju tamo gdje se traže visoka tvrdoća i čvrstoća nego otpornost na koroziju. Uobičajena primjena im je do 650 °C zbog mogućnosti opadanja mehaničkih svojstava i korozijske postojanosti na višim temperaturama.

[9]

3.3.1. Zavarljivost martenzitnih čelika

Prilikom zavarivanja martenzitnih čelika posebnu pažnju potrebno je posvetiti odabiru postupka zavarivanja, zaštitnim plinovima te čišćenju površine kako bi smanjili unos vodika. Korištenje predgrijavanja i naknadne toplinske obrade općenito se preporučuje jer se smanjuju količina vodika u metalu zavora i zaostala naprezanja. Smatra se da su zbog formiranja nepopuštenog martenzita za vrijeme hlađenja nakon zavarivanja martenzitni čelici najslabije zavarljivi od visokolegiranih čelika.

Naime ako se za vrijeme zavarivanja postigla temperatura veća od temperature austenitizacije dolazi do stvaranja krhkog martenzita sa znatno manjom žilavosti i duktilnosti od okolone mikrostrukture koja je toplinski prije obrađena. Takav zavareni spoj se ne može koristiti bez da se najprije toplinski obradi. [9]

Kod zavarivanja martenzitnih Cr – čelika u praksi se koriste materijali s postotkom ugljika manjim od 0,15 %. Kod većih udjela ugljika može doći do hladnih pukotina i zakaljivanja u zoni utjecaja topline (ZUT) što rezultira povećanjem tvrdoće, čvrstoće, pada duktilnosti i gubitka korozijske postojanosti.

Na svojstva metala zavora nakon zavarivanja te na utjecaj toplinske obrade nakon zavarivanja utječe se pravilnim odabirom dodatnog materijala. Svojstva zone utjecaja topline mogu se kontrolirati pravilnim odabirom postupka zavarivanja, parametara postupka zavarivanja i naknadnom toplinskom obradom. [9]

Dva su osnovna tipa dodatnih materijala koji se koriste kod zavarivanja martenzitnih čelika.

1. Dodatni materijal približno jednakog sastava kao osnovni materijal, kako bi dobili martenzitu strukturu nakon zavarivanja.
2. Austenitni (AISI 300) tipovi ili Inconel metal sa sadržajem Cr i Ni za potreban omjer miješanja (kao rezultat spajanja s osnovnog materijala), odabranog da konačni depozit osigura prihvatljivu količinu austenita koji povećava žilavost i istežljivost zavora. [1]

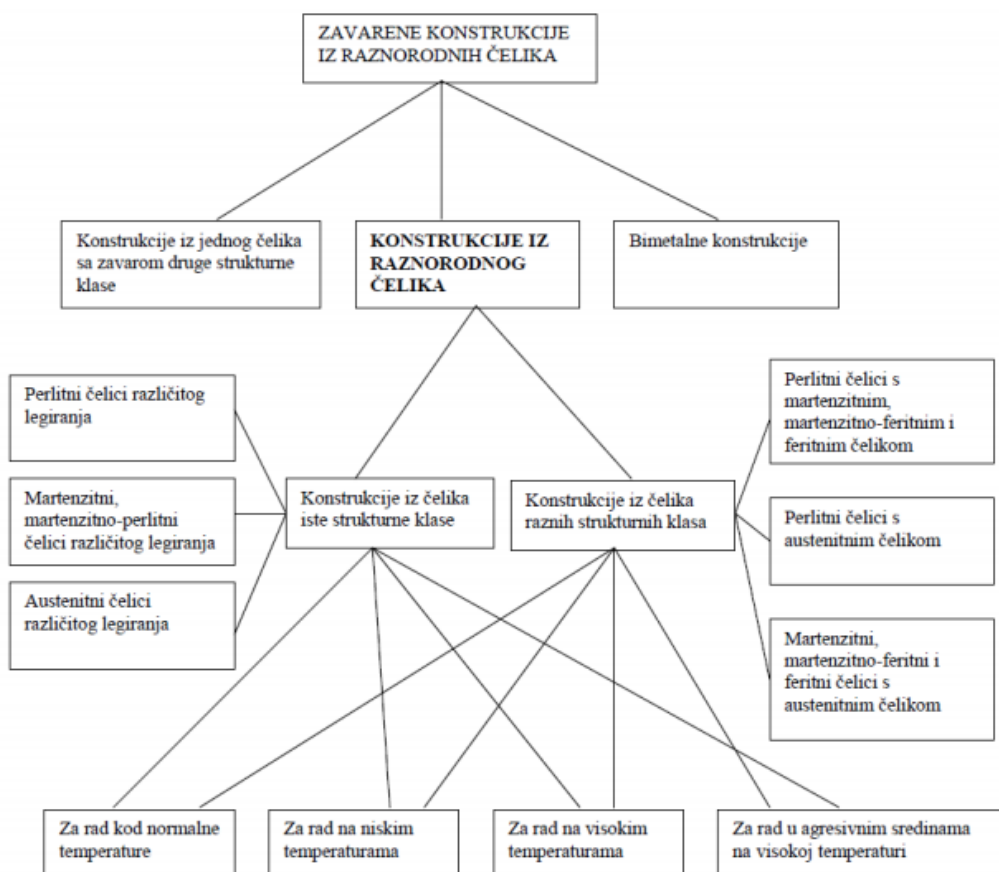
4. ZAVARIVANJE RAZNORODNIH ČELIKA

Razvojem industrije zahtjevi koji se nameću različitim dijelovima konstrukcije su postajali sve stroži, istovremeno su konstrukcije izložene različitim naprezanjima i djelovanju agresivne korozijske okoline. Kako bi se osiguralo ispravno funkcioniranje takvih dijelova sustava počela se razvijati uporaba različitih vrsta čelika, koji se spajaju zavarivanjem.

Uobičajeno se spajaju visokolegirani čelici s nisko/nelegiranim čelicima. Zbog svoje visoke cijene te otpornosti na koroziju dijelovi konstrukcije koji će biti izloženi djelovanju agresivnih korozijskih medija se izrađuju od visokolegiranih čelika, dok se ostatak konstrukcije izrađuje od klasičnih ugljičnih čelika koji će zadovoljiti uvjete eksploatacije. [10]

Osim zavarivanja prisutno je i navarivanje, oblaganje – platiranje gdje je osnovna ideja osigurati mehaničku otpornost (nosivost) s pomoću jeftinijeg niskougljičnog (nelegiranog ili niskolegiranog) čelika, a površinu tog nosivog dijela konstrukcije protiv kemijskog djelovanja nerazdvojivo obložiti – platirati metalnim korozijski postojanim materijalom. Danas se iz raznovrsnih i platiranih materijala izrađuju reaktori i izmjenjivači topline u kemijskoj industriji, generatori pare i reaktori u energetici i atomskoj tehnici, tlačni spremnici za skladištenje agresivnih kemikalija kao i cjevovodi većih promjera i debljina stjenke. [10]

Na slici 4. je prikazana najčešća vrsta podjele zavarenih konstrukcija od raznorodnih čelika. [10]



Slika 4. Podjela zavarenih konstrukcija od raznorodnih čelika [10]

4.1. Zavarljivost raznorodnih čelika

Tehnologija zavarivanja raznorodnih čelika je daleko složenija u odnosu na zavarivanje čelika iste strukturne klase. Ta složenost zavarivanja raznorodnih čelika proizlazi iz različitih strukturnih, mehaničkih i fizičko – kemijskih svojstava, a što se iskazuje kemijskom i strukturnom raznorodnošću unutar zavarenog spoja. Navedeni faktori imaju odlučujuću ulogu pri izboru postupka i tehnike zavarivanja, kao i izbora dodatnog materijala.

Također, tehnologija zavarivanja mora biti odabrana tako da se smanji difuzija ugljika u zoni staljivanja tijekom zavarivanja te moguće toplinske obrade. Posebnu pažnju kod zavarivanja raznorodnih čelika treba usmjeriti na predgrijavanje osnovnih materijala prije zavarivanja, kao i na toplinsku obradu po završetku zavarivanja.

Zahtjevi koji se odnose na zavarivanje raznorodnih čelika se mogu podijeliti na tehnološke i metalurške. [10]

4.1.1. Stupanj protaljivanja

Prilikom izbora dodatnog materijala i postupka zavarivanja vrlo je važno odrediti stupanj protaljivanja.

Glavni faktori stupnja protaljivanja su snaga izvora topline i karakter njegovog ponašanja, toplinska i fizikalna svojstva materijala i vrsta zavarenog spoja. Što je on veći veća je nejednakost kemijskog sastava u zoni zavara jer je veći udio osnovnog materijala u zavarenom spoju.

Stupanj protaljivanja je direktno vezan s kemijskom raznorodnošću, koja se javlja kod čelika različitih kemijskih sastava i utječe na svojstva tijekom eksploatacije.

Kod izbora postupka zavarivanja raznorodnih čelika, potrebno je odabrati takav postupak koji osigurava mali stupanj miješanja rastaljenog dodatnog materijala s osnovnim materijalom na strani raznorodnog spoja, kako bi se smanjila kemijska raznorodnost i postigla što bolja svojstva bez krhkih dijelova i što otpornija na pukotine. [10] [11]

Stupanj protaljivanja (γ) određuje se kao udio osnovnog metala u sastavu zavara, prema slijedećoj formuli [10]:

$$\gamma = \frac{n}{n + m}$$

gdje je:

n – udio protaljenog osnovnog metala u ukupnoj masi zavara [%]

m – udio nataljenog metala u zavaru [%]

Stupanj protaljenosti osnovnog materijala ovisi o vrsti i obliku zavarenog spoja.

4.1.2. Izbor dodatnog materijala

Kvaliteta i svojstva zavarenog spoja od različitih vrsta čelika uvelike ovise od odabiru dodatnog materijala. Izbor dodatnog materijala uvelike otežava to što se svojstva osnovnih materijala bitno razlikuju. Ovisno o vrsti čelika koji se zavaruje kao i uvjetima gdje će se koristiti, dodatni materijal može po svojim svojstvima biti sličniji više ili niže legiranom osnovnom materijalu ili ne mora biti sličan nijednom osnovnom materijalu.

Najvažnije je biti siguran da će se dobiti čvrstoća zavarenog spoja koja će zadovoljiti uvjete eksploatacije te koja ne bi smjela biti niža od čvrstoće niže legiranog čelika. Također, ako se pravilno izabere dodatan materijal treba onemogućiti nastanak difuzije koja uzrokuje krhkost i pojavu pukotina. [10]

Tako se kod zavarivanja feritno-perlitnih čelika sa austenitnim korozijski postojanim prednost se daje austenitnom dodatnom materijalu, zbog toga što se njegovom primjenom postiže zadovoljavajuća mikrostruktura zavarenog spoja i povoljna mehanička svojstva, te se s porastom legiranih elemenata snižuje stupanj protaljivanja. [10]

Pri uporabi feritno-perlitnog dodatnog materijala, sa austenitnim korozijski postojanim materijalom, dolazi do znatno većeg protaljivanja. Razlog tome je niže talište i niža toplinska provodljivost austenitnog u usporedbi sa feritno-perlitnim čelikom. Prilikom i vrlo malog protaljivanja austenitnog čelika u perlitnim zavarima primjećuje se nastanak krhke martenzitne strukture kod koje je izgledan nastanak pukotina, te iz tog razloga nije preporučljivo koristiti feritno-perlitni uglični dodatni materijal kod zavarivanja raznorodnih čelika. [10]

Kod spajanja martenzitnih čelika i niskolegiranih feritnih može se koristiti standardni dodatni materijal, a kod zavarivanja martenzitnog i austenitnog čelika se koristi dodatni materijal na bazi nikla. Korištenjem dodatnog materijala na bazi nikla, širina martenzitne zone će se vjerojatno smanjiti što zavareni spoj čini otpornijim na povišenim temperaturama. [10]

Osim nadzora samog protaljivanja i neki drugi faktori utječu na odabir dodatnog materijala.. Ako je velika razlika u talištima čelika koji će se zavariti (kao što je to s feritno-perlitnim i austenitnim čelikom), temperatura na kojoj se skrućuje metal zavara treba biti u osnovi bliža onoj od čelika s nižom temperaturom taljenja. Ako je temperatura skrućivanja metala zavara uvelike iznad temperature skrućivanja jednog od osnovnih metala, u zoni utjecaja topline metala koji se posljednji skrućuje postoji mogućnost nastanka toplih pukotina.

U općem slučaju prilikom odabira dodatnog materijala potrebno je osigurati tražena mehanička svojstva i mikrostrukturu zavarenog spoja, te otpornost na koroziju, krhkost i toplinski umor. [12]

U tablici 5. dan je prikaz dodatnih materijala koji se mogu upotrijebiti za zavarivanje visokolegiranih austenitnih čelika s nelegiranim čelicima koristeći MAG postupak zavarivanja. [12]

Tablica 5. Prikaz dodatnih materijala za zavarivanje VAČ s nelegiranim čelicima MAG postupkom [12]

RB	Oznake	USA	Maseni udio elemenata (%)								Schaeffler	
			C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Mo	Cr _e	Ni _e
1.	G 18 8 MnSi	307 Si	0,12	6,5	0,8	18,5	8,5	0,025	0,025	-	19,71	15,35
2.	G23 12 LSi	309 LSi	0,03	2	0,9	24	13	-	-	-	25,35	14,9
3.	G23 12 2	309 MoL	0,015	1,5	0,5	22	14,5	-	-	2,6	25,35	15,7
4.	G 25 20	310	0,1	1,7	0,4	23,6	21	-	-	-	24,2	24,95
5.	G 299	312	0,1	1,9	0,5	30,5	9,2	-	-	-	31,25	13,15

4.1.3. Izbor postupka zavarivanja

Sam postupak zavarivanja nije presudan pri zavarivanju raznorodnih čelika, najvažnije je odabrati ispravnu tehnologiju zavarivanja koja će omogućiti minimalno protaljivanje – miješanje (penetraciju) rastaljenog dodatnog materijala s osnovnim na strani raznorodnog spoja. To je potrebno ostvariti kako bi se spriječilo nastajanje krhkih struktura te kasnije nastanak pukotina koje bi te krhke strukture inicirale u prijelaznom sloju posebno ako je riječ o zavarivanju austenitnog korozijski postojanog čelika s ugljičnim feritno-perlitnim čelikom. [10]

U primjenjive postupke zavarivanja za spajanje čelika različitih strukturnih vrsta ubrajaju se [10]:

- postupci zavarivanja taljenjem (REL, MIG, EPP, TIG) s rasponom miješanja prikazanim u tablici 6.
- postupci zavarivanja taljenjem s jako malim razrjeđenjem – miješanjem metala zavara (postupci s pulsirajućim lukom, zavarivanje elektronskim mlazom, zavarivanje laserom)
- postupci spajanja koji ne uključuju taljenje (zavarivanje trenjem, zavarivanje eksplozijom i difuzijsko spajanje mekim i tvrdim lemljenjem).

Tablica 6. Stupnjevi miješanja ovisno o postupku zavarivanja [10]

Postupak	Stupanj miješanja, d
EPP zavarivanje trakom/TIG s toplom žicom	8-20 %
TIG	15-100 %
REL s rutilnom elektrodom	15-25 %
REL s bazičnom elektrodom	20-30 %
MAG	20-40 %
MAG impulsno	10-30 %
EPP zavarivanje žicom	30-50 %

4.1.4. Difuzijski procesi

Difuzijski procesi predstavljaju jedan od glavnih problema pri zavarivanju. Difuzija je kretanje atoma kroz materijal i kao takva ima velik utjecaj na kvalitetu zavarenog spoja i ponašanje za vrijeme eksploatacije. Proces difuzije su mogući tijekom zavarivanja, toplinske obradbe i rada pri visokim temperaturama. [10]

Javljaju se različiti oblici difuzijskih procesa: [10]

- a) gibanje atoma kroz kristalnu rešetku (volumna difuzija),
- b) difuzija po površini ili površinska difuzija,
- c) difuzija duž granica kristala (zrna),
- d) difuzija duž dislokacija i drugih površinskih i linijskih nepravilnosti.

Na visokim temperaturama je osim volumne difuzije zbog smanjenog volumena granica kristala i dislokacija prisutna i difuzija po granicama zrna.

Ugljik je element koji je najviše sklon difuziji zbog njegovih malih atoma, osim njega povećanu pokretljivost pokazuju i ostali karbidotvorci (Cr, Mo, V). Izravna posljedica difuzije koja je ustanovljena ispitivanjima je nastanak zone bogate karbidima (pougličenje) male plastičnosti u višelegiranom materijalu jer se elementi skloni difuziji kreću iz materijala s nižim stupnjem legiranja u onaj s višim.

S druge strane u manje legiranom materijalu nastaje zona male čvrstoće i malog udjela ugljika (razugličenje). Proces se uvelike pospešuje ako je zavareni spoj izložen višim temperaturama dulje vrijeme. Neovisno o ugljiku, dušik i kisik se također kreću prema višelegiranom materijalu tako da ispražnjena zona postaje jako čista. Iz tog razloga temperatura rekristalizacije pada na vrlo nisku razinu, koja je za feritni čelik na oko 500 °C. Najniža temperatura kod koje počinje difuzija ugljika iznosi 425°C, a kod 800°C je difuzija najintenzivnija. [10,13]

Postoji veliki broj faktora koji omogućuju difuziju lako pokretljivih elemenata u zavarenom spoju [13]:

- prisutnost elemenata s većim afinitetom prema ugljiku u jednom od čelika koji se zavaruje u usporedbi sa željezom,
- istovremena tekuća i čvrsta faza u zoni spajanja,
- zagrijavanje okolne zone materijala koji se zavaruje do temperature kod koje dolazi do transformacije željeza $\alpha \rightarrow \gamma$ pri kojoj je povećana rastvorljivost ugljika,
- velika razlika sadržaja ugljika u metalima koji se zavaruju.

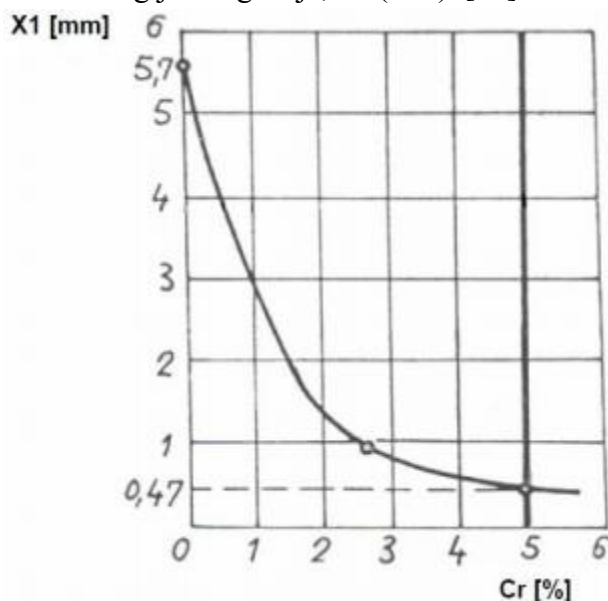
Načini smanjenja migracije ugljika, odnosno difuzijskih procesa [10]

- Legiranje ugljičnog čelika elementima koji stvaraju karbide, kao što su Ti i Nb, a jači su karbidotvorci od Cr.

Kada su prisutni u ugljičnom čeliku, ovi elementi omogućuju ugljiku da se poveže u stabilne karbide.

-Oblaganje strane ugljičnog čelika austenitnim materijalom ili uporaba materijala na osnovi nikla (razina difuzije u niklu je niska te se ograničava rast razugljičenog spoja i nakon dužeg izlaganja visokim temperaturama).

Najčešći element koji se koristi za stvaranje stabilnih karbida je krom, na slici 5. je prikazan njegov utjecaj na difuzijske procese. U dijagramu apcisa označava udio kroma, dok je na ordinati označena širina razugljičenog sloja, x_1 (mm). [13]



Slika 5. Utjecaj sadržaja kroma u ugljičnom čeliku na širinu razugljičenog sloja [10]

Iz dijagrama je vidljivo da kod zavarivanja čelika s 5 % Cr nastaje širina razugljičenog sloja od 0,47 mm. Time se smatra da kod zavarivanja raznorodnih čelika, gdje ugljični čelik posjeduje minimalno 5 % Cr skoro pa potpuno isključuje razvijanje difuzije.

Postoji mogućnost velikih toplinskih naprezanja kao i velike heterogenosti u strukturi i kemijskom sastavu, stoga tehnološko oblikovanje može biti dobro rješenje kod zavarivanja raznorodnih čelika, primjerice korištenje različitih presjeka prijelaznih djelova, kao cijevi, ploče, trake, šipke. [13]

4.1.5. Strukturna heterogenost i primjena Schaefflerovog dijagrama

Za pouzdanost i traženu kvalitetu konstrukcija ili dijelova konstrukcija izrađenih od spojeva od raznorodnih čelika, potrebno je izbjeći nastanak krhkih dijelova u zavarenom spoju. Uzimajući to u obzir, prilikom izbora dodatnog materijala i određivanja stupnja mješanja potrebno je ispravno procijeniti strukturu i svojstva pojedinih dijelova zavarenog spoja. Ako bi se naprimjer zavarivali niskolegirani zakaljivi čelici s austenitnim korozivski postojećim čelicima faktori koji bi bili bitni su :

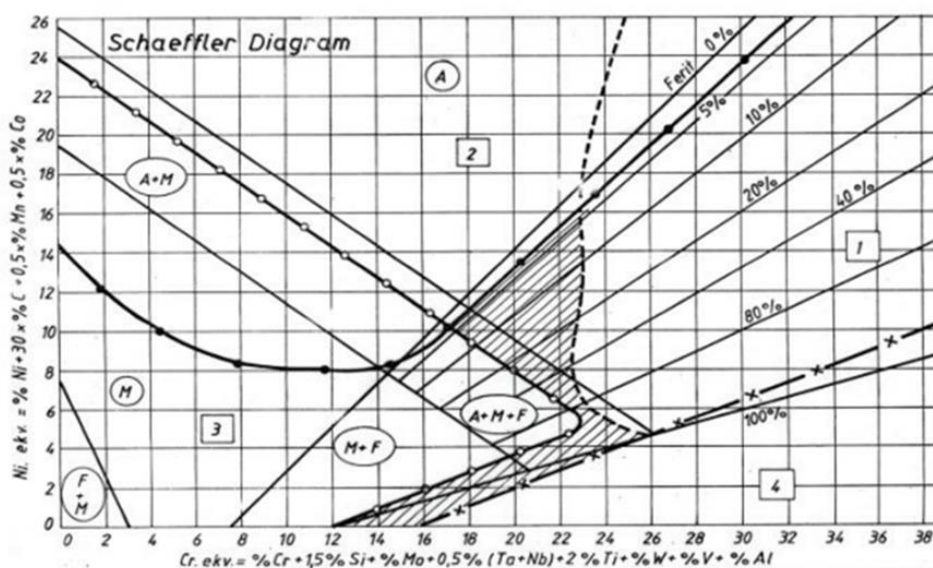
1) kako bi se spriječile tople pukotine u austenitnom materijalu potrebno je ispravno odabrati dodatni materijal

2) upravljanje procesima difuzije (migracije) elemenata iz niskolegirano čelika, uglavnom ugljika u zonu mješanja kako bi se spriječio nastanak krhke međustrukture

Prvi faktor određuje kvalitetu dodatnog materijala, a drugi određuje područje primjene raznorodnog spoja. U postupku zavarivanja raznorodnih čelika vrlo je bitno predvidjeti strukturu koja će nastati nakon procesa. [10]

Schaeffler je Cr ekvivalentom (na apcisi) izrazio utjecaj elemenata koji pospješuju stvaranje ferita (α –geni elementi), a Ni ekvivalentom (na ordinati) utjecaj elemenata koji podupiru stvaranje austenita (γ –geni elementi). Struktura depozita se određuje na temelju kemijskog sastava koji se izražava ekvivalentima nikla i kroma te sastav strukture depozita se određuje u područjima: austenita (A), ferita (F), martenzita (M) i kombinacija (A + F; A + M; A + M + F; F + M). Na slici 6, prikazan je Schaeffler-ov dijagram kojeg je dopunio DeLong i M.C.T. Bystram.

DeLong je u Ni ekvivalent unio utjecaj dušika mjereći i sadržaj delta ferita feritnim brojem FN. [10]



Slika 6., Schaeffler-ov dijagram dopunjen DeLongom i M.C.T. Bystramom [10]

Dopuna koju je M.C.T. Bystram uveo obuhvaćaju 4 linije koje označavaju 4 područja: [10]

1. područje: na temperaturama od 500°C do 900°C dolazi do pojave krhke σ - faze u osnovnom i dodatnom materijalu što rezultira povećanom krhkošću. U austenitno feritnom polju najviše su skloni čelici s više od 10 % δ – ferita (α – faze).

2. područje: Sa slike 6 je vidljivo da to područje obuhvaća materijale austenitne i djelomično austenitno-martenzitne mikrostrukture. Oni su iznad 1250 °C skloni nastanku toplih pukotina, pa ukoliko se zavaruju s čisto austenitnim dodatnim materijalom moguća je pojava toplih pukotina, te treba koristiti dodatni materijal koji sadrži između 3-10 % ferita.

3. područje: U tom području nalaze se zavareni spojevi s krhkom martenzitno – austenitnom i martenzitno – feritnom strukturom , oni su na temperaturam ispod 400 °C izuzetno skloni pojavi hladnih pukotina. Predgrijavanje i naknadno žarenje mogu biti rješenja za taj problem. Ovo područje prekriva i jedan dio područja 2 u prekriženom dijelu te može doći i do pojave toplih pukotina

4. područje: Obuhvaća veliki dio čistog ferita i djelomično austenita time i korozijski postojeane čelike s vrlo niskim sadržajem ugljika. Iznad 1100°C dolazi do jakog rasta kristalnog zrna te su posljedice krhkost, znatno smanjenje žilavosti te sklonost pukotinama.

Optimalan sastav zavarenog spoja se nalazi u šrafriranom području , te je stoga vrlo bitno da se zavar nalazi u tom području.

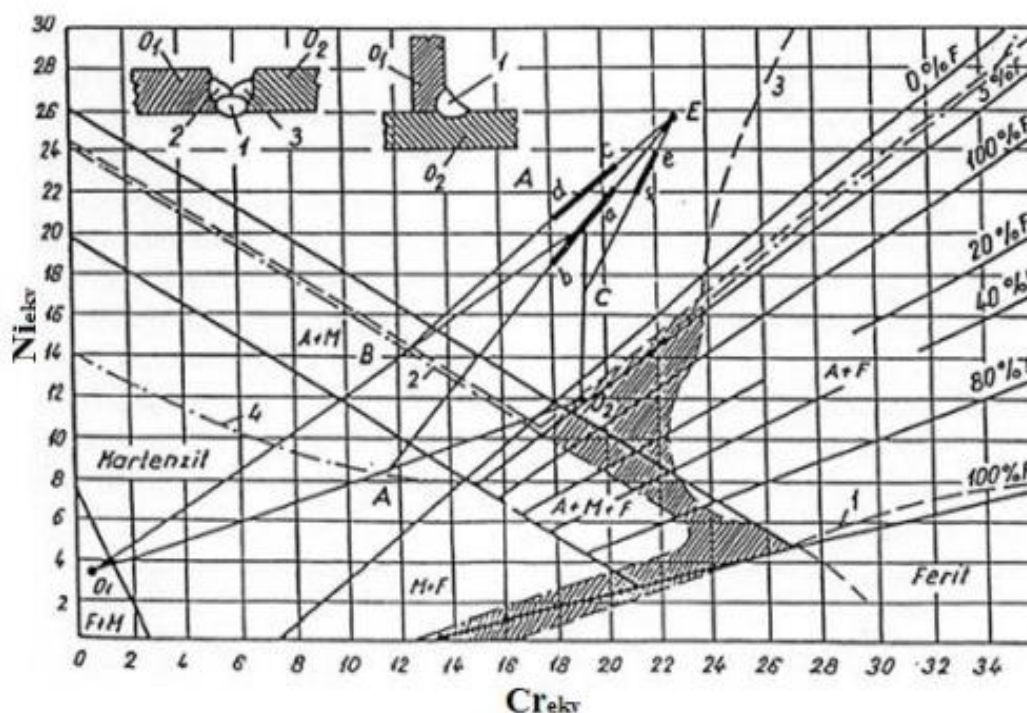
Kvaliteta čelika , koji ima kemijski sastav u propisanim granicama, može se u Schaeffler-ovom dijagramu prikazati omeđenim područjem koje određuje mogući položaj čelika konkretnog sastava. [10] Čelik određenog sastava kao i nanesei dodatni metal (navar ili čisti zavar) određeni su u dijagramu točkom čiji je položaj definiran njihovim Cr- i Ni-ekvivalentom. Cre i Nie ekvivalenti izračunavaju se po sljedećim formulama: [10]

$$Cre = \%Cr + 1,5\%Si + \%Mo + 0,5\%Ta + Nb + 2\%Ti + \%W + \%V + \%Al$$

$$Nie = \%Ni + 30\%C + 0,5\%Mn + 0,5\%Co$$

Strukturno stanje zavarenog spoja može se pratiti na liniji koja spaja točke osnovnog i dodatnog metala. Ako podijelimo dužine u postotne dijelove može se u analizu unijeti čimbenik stupnja protaljivanja (penetracije, miješanja) s osnovnim metalom.

Takav slučaj je prikazan na slici 7. Ako je npr. stupanj miješanja osnovnog kod ručnog elektrolučnog zavarivanja (REL) 20 – 40 %, vrijednosti se mogu unijeti u dijagram (podebljana crta – odsječak a-b na dužini O1-E na slici 7. [10]



Slika 7.: Prikaz primjene Schaeffler-ovog strukturnog dijagrama pri prethodnom određivanju kemijske i strukturne heterogenosti slojeva zavora [10]

U korijenskom prolazu (1) srednji sastav rastajenih rubnih dijelova spoja odgovarat će A na dužini O1 – O2. . Protaljšivanje je kod austenitnog čelika (O2) veće nego kod feritno – perlitnog čelika (O1) uslijed niže toplinske provodljivosti austenitnog čelika te je stupanj protaljšivanja za niskolegirani čelik oko 40 %, a za austenitni čelik oko 60 %.

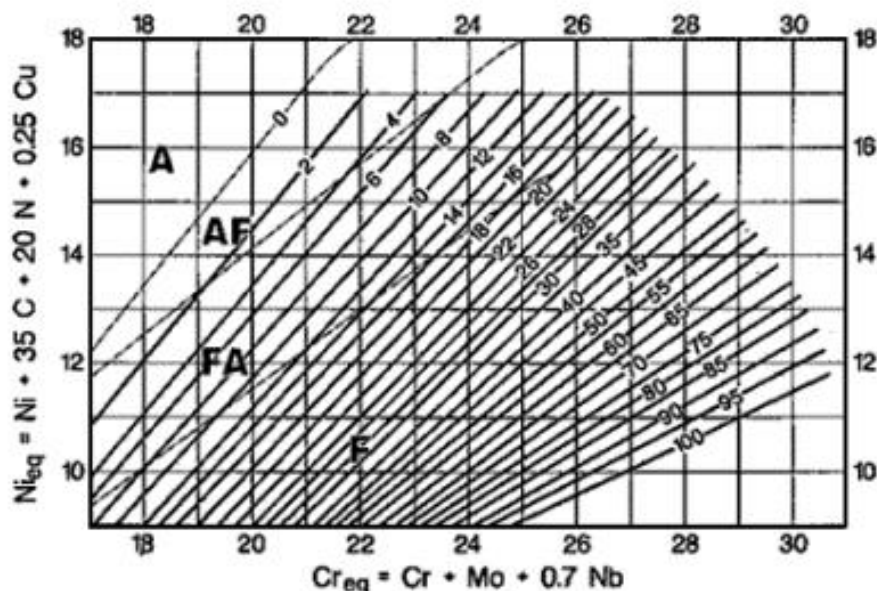
Na dužini A-E dijelom a-b određena je struktura i sastav korijenskog sloja. Dijelom c-d na liniji BE je određen sastav metala koji nastaje protaljšivanjem niskolegiranog feritno -perlitnog čelika i korijenskog sloja. Protaljšivanje austenitnog čelika i korijenskog sloja nastaje na dužini C-E kod odsjeka e-f. [10]

Više istraživača je u cilju povećanja točnosti primjene Schaefflerovog dijagrama nastojalo utvrditi utjecaj alfa-genih i gama-genih elemenata. Siewert/McCowan/Olsen objavili su 1988. WRC dijagram kao unaprjeđenje Schaeffler-ovog dijagrama, a poboljšanje WRC dijagrama je u tome što preciznije određuje sadržaj alfa-faze (tzv. feritni broj FN).). Kotecki i Siewert su 1992., dopunili WRC dijagram unoseći utjecaj bakra. Bakar je dodan Ni-ekv. s množiteljem 0,25. [10]

Glavne značajke WRC dijagrama su sljedeće [10]:

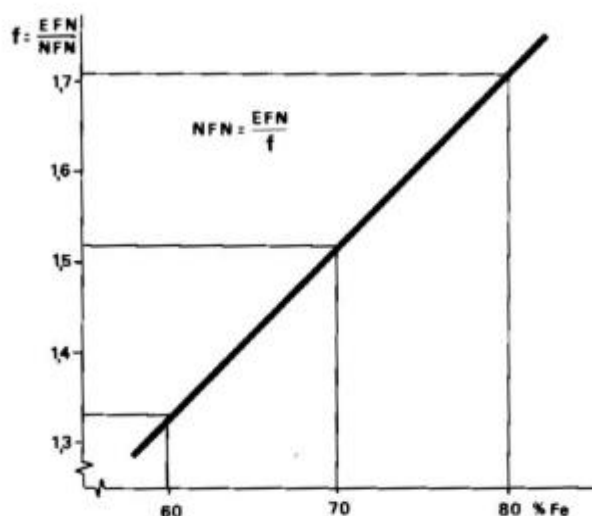
- drugačiji udjeli za neke elemente pri izračunavanju Cre i Nie ekvivalenta
- preciznije određivanje ferita (0 – 100 FN)
- dijagram je primjenjiv za čelike sastava maks. 10 %Mn, 3 %Mo, 0,2 %N i 1 %Si
- dijagram vrijedi za područje 17 – 31 %Cre i 9 – 18 %Nie
- dijagram je puno precizniji nego Schaeffler-ov i DeLong-ov strukturni dijagram.

Kako je izvorno WRC dijagram namijenjen za područje povećanog Cr-ekv. i Ni-ekv. potrebno ga je ugraditi u postojeći Schaeffler-ov strukturni dijagram kako bi bilo moguće provoditi analizu. WRC dijagram je prikazan na slici 8.



Slika 8.: WRC dijagram [10]

Najbolju procjenu feritnog broja (FN) daje WRC 1992 Constitution dijagram, a stari Schaefflerov daje najbolje rezultate za raznorodne spojeve, zavarivanje čelika sa prevlakama, proračun sastava i položaj razrijeđenog metala zavara. Sadržaj ferita ne možemo točno izmjeriti te sadržaj ferita u metalu zavara ne možemo smatrati feritnim brojem, ali sadržaj ferita možemo izračunati dijeljenjem FN (feritnog broja) s faktorom f . Faktor f pak je ovisan o postotku željeza u metalu zavara te ga dobivamo putem dijagrama koji je prikazan na slici 9. [14]



Slika 9. Faktor f ovisan o postotku Fe u metalu zavara [14]

5. ZAOSTALA NAPREZANJA I DEFORMACIJE ZAVARENIH SPOJEVA

Prilikom zavarivanja dolazi do naprezanja zbog unosa topline u materijal, te rastezanja materijala, potom za vrijeme hlađenja i njegovog skupljanja. Te promjene se događaju u jednoj lokalnoj zoni, u samom zavarenom spoju, te u uskoj zoni oko spoja. Dio radnog komada koji nije pod utjecajem topline, tzv. hladna zona odupire se širenju dijela radnog komada, tlači ga.

Kako je to tlačenje djelomično veće od granice razvlačenja (R_e) materijala dolazi do zbijanja zagrijanog dijela materijala zavora i zone uz zavar. Kod hlađenja taj se zagrijani materijal nastoji vratiti na prvobitnu dužinu, međutim s obzirom da je došlo do zbijanja, a tim i do skraćivanja utjecajne zone, pojavljuju se vlačne, a istodobno i tlačne sile koje nastoje materijal vratiti u prvobitno stanje. Te sile nazivaju se zaostala naprezanja i postoje u svakom zavarenom spoju, samo su različitih veličina. [15]

Kao drugi rezultat unosa topline javljaju se deformacije te su deformacije sa zaostalim naprezanjima u obrnuto proporcionalnom odnosu, odnosno vrijedi da čim su deformacije veće, naprezanja su manja i obrnuto.

Osim prilikom samog zavarivanja, zaostala naprezanja mogu nastati i tijekom toplinske obrade ili za vrijeme eksploatacije sa cikličkom promjenom temperature.

Zaostala naprezanja i deformacije nisu jednake u svim materijalima s obzirom na različitost svojstava materijala te su tu ključni faktori koeficijent toplinskog rastezanja (α), kao i toplinska vodljivost materijala (λ). [15]

Upravo zbog tog razloga prilikom zavarivanja raznorodnih čelika potrebno je veliku pažnju obratiti nastanku zaostalih naprezanja i deformacija. Što je veća razlika u koeficijentima linearnog istezanja materijala koji se zavaruju bit će i veći stupanj nastalih napetosti.

U tablici 7. su prikazana svojstva različitih vrsta čelika. [10]

Kod zavarenih raznorodnih spojeva kod kojih su izrazite razlike u koeficijentima linearnog istezanja, za vrijeme rada mogu se pojaviti pukotine uslijed toplinskog zamora zbog cikličkih promjena temperature (velike i česte promjene). Kod takvog primjera preporuča se izbor dodatnog materijala čiji je koeficijent linearnog istezanja približno jednak onom kod ugljičnog konstrukcijskog čelika (npr. legure nikla). U tom slučaju najveća opterećenja će se pojaviti na strani korozijski postojanog čelika što će se nadoknaditi većom duktilnošću zbog prisutnosti nikla. [10]

Tablica 7.: Svojstva različitih vrsta čelika [10]

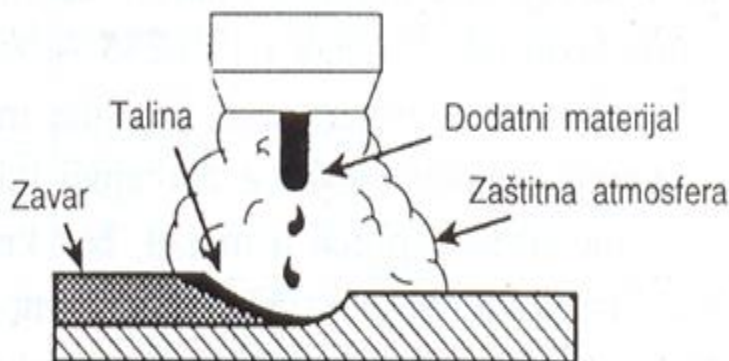
<div>svojstvo \ Vrsta čelika</div>	Austenitni Cr-Ni čelici	Feritni Cr čelici	Martenzitni Cr čelici	Precipitacijom očvrstivi čelici	Ugljični čelici
Gustoća, ρ (kgm ⁻³)	7800-8000	7800	7800	7800	7800
Koeficijent linearnog istezanja (0-500 °C), $\alpha/10^{-6} K^{-1}$	17,0-19,2	11,2-12,1	11,6-12,1	11,9	11,7
Koeficijent toplinske vodljivosti (100 °C), $\lambda/W m^{-1}K$	18,7-22,8	24,2-26,3	28,7	21,8-23,0	60
Specifični električki otpor /10 ⁻⁶ Ωm	69-102	59-67	55-72	77-102	12
Specifični toplinski kapacitet (0-100 °C), c/J kg-1K-1	460-500	460-500	420-460	420-460	480
Vlačni modul elastičnosti, E/GPa	190-200	200	200	200	210
Područje taljenja /°C	1400-1450	1480-1530	1480-1530	1400-1440	1538

6. MIG/MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA

MIG (metal inert gas)/MAG(metal active gas) je naziv za elektrolučni postupak zavarivanja taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog (Ar, He i mješavine) ili aktivnog(CO₂ i mješavine) plina . Uloga zaštitnog plina je osigurati da rastaljeni metal i električni luk budu zaštićeni od negativnog ujecaja okoline te ionizirati vodljivi prostor za održavanje električnog luka. Električni luk se stvara između vrha žice (koja je uobičajeno spojena na + pol istosmjernog izvora) koja obavlja ulogu elektrode i dodatnog materijala i radnog komada pri čemu se žica kontinuirano dodaje preko dodavača i pištolja u rastaljenu zonu. Taljenjem žice se popunjava unaprijed pripremljen prostor. [16]

Prema normi HRN EN ISO 4063:2012 Zavarivanje i srodni postupci - Nomenklatura postupaka i referentni brojevi označava se oznakom 135. [16]

Na slici 10. je prikazana shema MIG/MAG postupka zavarivanja.



Slika 10. Shema MIG/MAG postupka zavarivanja [16]

6.1. Prednosti i nedostaci MIG/MAG postupka zavarivanja

MIG/MAG postupak je jedan od najkorištenijih u današnjoj industriji zahvaljujući svojim brojnim prednostima.

Prednosti MIG postupka[15]:

- Primjenjiv za zavarivanje svih vrsta materijala
- Velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa materijala
- Zavarivanje u svim položajima
- Zavarivanje u radionici i na terenu
- Mogućnost primjene različitih plinskih mješavina
- Mogućnost primjene praškom punjene žice
- Široki raspon debljina
- Velika učinkovitost i proizvodnost
- Pogodan za automatizaciju
- Moguća primjena i za lemljenje

S druge strane postoje neka ograničenja koja otežavaju uspješnu primjenu ovog postupka.

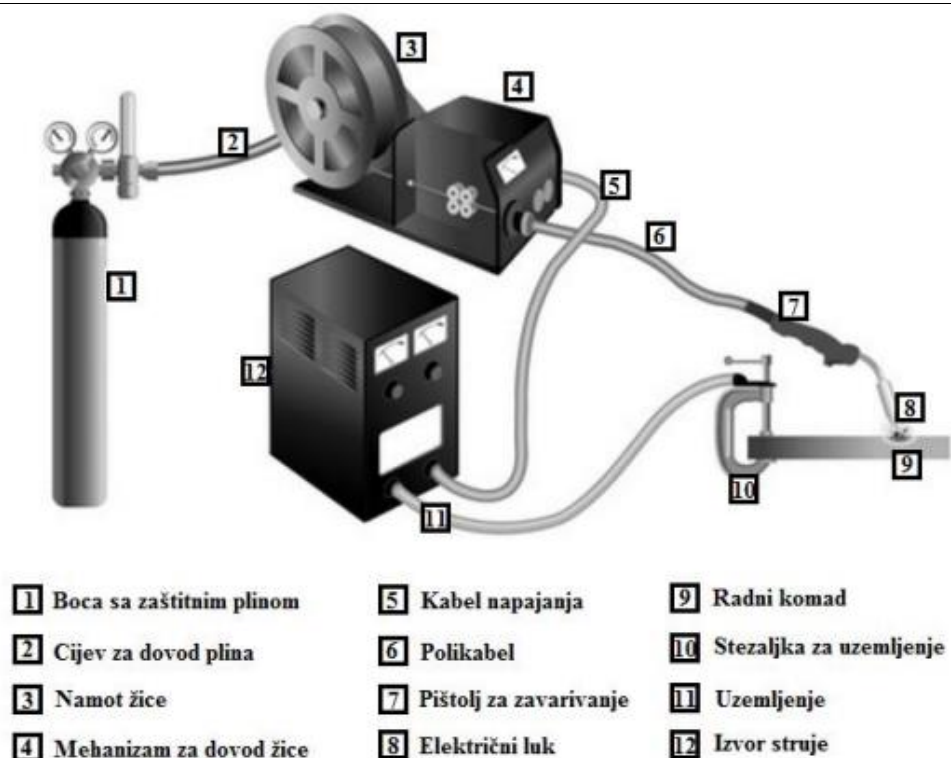
Nedostaci MIG/MAG postupka[15]:

- Kod rada na terenu moguće greške zbog loše zaštite-vjetar!
- Problemi kod dovođenja žice (posebno aluminij)
- Veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja (naljepljivanje, poroznost)
- Štrcanje kod zavarivanja kratkim spojevima (gubici i potreba za naknadnom obradom!)
- Složeniji uređaji (dovođenje žice, automatska regulacija)

6.2. Oprema za MIG/MAG postupak zavarivanja

Opremu za MIG/MAG čine: izvor istosmjerne ili izmjenične struje , polikabel, uređaj za hlađenje, dodavač žice s pripadajućim mehanizmom, pištolj za zavarivanje, boca sa zaštitnim plinom te regulator protoka plina. Električna struja dolazi iz izvora struje za zavarivanje, koji je priključen na električnu mrežu, putem vodiča od kojih je jedan priključen na radni komad, a drugi na pištolj za zavarivanje. S kontaktne vodilice električna struja prolazi žicom, koja se kontinuirano i automatski odmata s koluta. Zaštitni plin dolazi na mjesto zavarivanja iz čelične boce putem polikabela kroz sapnicu pištolja. Kontaktna vodilica pištolja, koja služi za vođenje elektrode i za dovođenje struje zavarivanja na žicu te sapnica za plin koja služi za dovod zaštitnog plina, potrošni su dijelovi pištolja te ih se po potrebi može lako zamijeniti. Pištolji za zavarivanje pritom mogu biti hlađeni zrakom (za radne komade manjih debljina i manjih struja zavarivanja) ili vodom (za jače struje zavarivanja i materijale veće toplinske provodljivosti). MIG postupak je danas lako automatizirati , ovisno o potrebi, postoji izbor između poluautomatskog (dodavanje žice je mehanizirano, a vođenje pištolja ručno), automatskog (glava pištolja pokretana je automatskim mehanizmom, a radni komad je nepomičan ili obratno) ili robotiziranog sustava za MAG zavarivanje. [17]

Na slici 11. Je prikazana oprema za MIG/MAG zavarivanje. [17]



Slika 11. oprema za MIG zavarivanje [17]

6.3. Parametri MIG/MAG postupka zavarivanja

Osnova dobre kvalitete zavarenog spoja je pravilan odabir parametara zavarivanja, kod MIG/MAG zavarivanja najvažniji parametri su [15,17]:

- jakost struje I , A : o jakosti struje ovisi način prijenosa metala, stabilnost električnog luka , penetracija i depozit rastaljenog metala. Njen iznos se određuje ovisno o promjeru žice, debljini i vrsti materijala koji se zavaruje , o tehnici rada te o željenom načinu prijenosa metala. Iznos može biti od nekoliko desetaka A sve do nekoliko stotina A.
- brzina zavarivanja: v_z , m/s - parametar o kojem ovisi produktivnost postupka zavarivanja i zbog toga ga treba pažljivo i pravilno odabrati. Odabir brzine zavarivanja ovisi o položaju zavarivanja. Izgled profila zavar direktno ovisi o brzini zavarivanja (povećanjem brzine zavarivanja zavar postaje uži, a penetracija manja, dok smanjenjem brzine zavarivanja zavar postaje širi, a penetracija veća).
- slobodni kraj žice ,mm - odnosi se na dio žice od kraja vodilice žice do početka električnog luka. Duljina slobodnog kraja žice utječe na jakost struje, što je duži slobodan kraj veći je otpor protoku struje, te je ona manja. I obrnuto što je slobodan kraj kraći, otpor protoku je manji , te je struja jača. Da bi se izveo kvalitetan zavareni spoj potrebno je slobodni kraj žice održavati konstantne duljine.

- napon U, V - stabilnost električnog luka te njegova duljina i širina direktno ovise o naponu. Veći napon uzrokuje dulji električni luk čime se dobiva širi zavar uz manju penetraciju. Iznos napona drugačiji je za različite načine prijenosa metala.
- protok i vrsta zaštitnog plina l/min - kako je već prije rečeno uloga zaštitnog plina je da zaštiti zavareni spoj od negativnog utjecaja okolina. Osim toga ima velik utjecaj na oblik zavaru te na brzinu zavarivanja i stabilnost električnog luka. Protok zaštitnog plina regulira se u odnosu na jakost struje zavarivanja, uvjete u kojima se vrši zavarivanje i karakteristike spoja koji se zavaruje. Za veću struju zavarivanja potreban je i veći protok zaštitnog plina.
- promjer i vrsta žice, mm – određuje se ovisno o vrsti i debljini materijala koji se zavaruje te o jakosti struje.

6.4. Načini prijenosa metala pri MIG/MAG postupku zavarivanja

Kod MIG/MAG zavarivanja, dobro poznavanje procesa prijenosa metala vrlo je bitno kako bi se postigla visoka kvaliteta i produktivnost procesa zavarivanja, načini prijenosa metala ovise o naponu, jakosti struje, polaritetu, sastavu i promjeru žice.

Dva su mehanizma prijenosa materijala od elektrode do radnog komada, a to su slobodni let i premošćivanje. Kod prijenosa slobodnim letom razlikuje se štrcajući i impulsni luk, dok se kod premošćivanja razlikuje prijenos metala kratkim spojevima i mješovitim lukom. [16]

6.4.1. Prijenos materijala kratkim spojem

Pri ovom načinu prijenosa, elektroda tj. žica koja se dovodi se tali uslijed uzastopno ponavljajućih kratkih spojeva. Uobičajeno se dogodi između 100 i 200 kratkih spojeva u sekundi. Karakterističan je nizak unos topline te karakteristične vrijednosti napona (13 - 21 V) i jakosti struje zavarivanja (50 - 170 A) manje su od napona i jakosti struje zavarivanja kod ostalih načina prijenosa metala. Ovaj prijenos metala idealan je za zavarivanje tanjih materijala (0,6 - 5,0 mm) zbog malog unosa topline. Promjeri elektrode koje se koriste pri zavarivanju kratkim spojevima kreću se između 0,6 mm i 1,2 mm. [16,18]

6.4.2. Prijenos metala prijelaznim lukom

Prijenos metala se odvija kombiniranim djelovanjem kratkih spojeva i štrcajućeg luka, što uzrokuje taljenje žice koja se kontinuirano dovodi.

Za postizanje prijenosa metala prijelaznim lukom uobičajene su struje od 170 – 235 A te naponi od 22 V do 25 V, ovisno o promjeru elektrode. Takvi parametri uzrokuju pojavu većih kapljica koje se nepravilno odvajaju od elektrode i padaju u talinu te je posljedica toga pojava rasprskavanja, također položaj zavarivanja je ograničen na horizontalne položaje, lošije je kvašenje taline, što može uzrokovati nepotpuno spajanje materijala i nastajanje pukotina te je zavar izbrazdan i nepravilan. Zbog svih navedenih nedostataka ovaj način prijenosa metala se rijetko koristi u praksi, pokušava ga se izbjeći. [16,18]

6.4.3. Prijenos metala štrcajućim lukom

Za ovaj način prijenosa metala karakterističan je velik unos topline, talina se prenosi u obliku malih kapljica te prilikom toga elektroda ne dodiruje radni komad.

Karakteristične vrijednosti napona su 22-40 V te jakosti struje od 200-600 A, te su veće nego kod prije navedenih načina prijenosa metala, zbog toga je pogodan za zavarivanje debljih materijala. Prednosti su što nije potrebno dodatno čišćenje jer nema prskanja, ostvaruje se veliki depozit uz veliko iskorištenje elektrode (do 98%), moguće je koristiti širok izbor dodatnih materijala te je pogodan automatizaciji. Neki od nedostataka su što je pogodan samo za deblje radne komade, nije moguće zavarivati u svim položajima te su skuplji zaštitni plinovi nego kod drugih načina prijenosa metala. [16,18]

6.4.4. Prijenos metala impulsnim lukom – kontrolirani prijenos štrcajućim lukom

Izvor struje generira promjenjiv oblik struje – impuls, kojem se mijenja jakost struje od maksimalne vršne vrijednosti do vrijednosti osnovne struje. U trenutku kada je vrijednost struje maksimalna , kapljica dodatnog materijala se odvaja i slobodnim letom putuje prema radnom komadu, tada vrijednost struje pada na osnovnu vrijednost što osigurava srednju vrijednost unosa topline. Promjenjiv je za zavarivanje u svim položajima , te za zavarivanje tanjih materijala nego prijelaznim lukom, zbog srednjeg unosa topline. [16,18]

7. EKSPERIMENTALNI RAD

Eksperimentalni dio završnog rada je napravljen u laboratoriju za zavarivanje te u laboratoriju za zaštitu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje, ispitivanja zavarenog spoja su izvršena prema normi ISO 15614-1. U svrhu ispitivanja napravljena su dva ispitna uzorka koji su zavareni MIG postupkom. Uzorak 1 je zavaren u dva prolaza, dok je uzorak 2 zavaren u 3 prolaza. Potom se obavila vizualna kontrola, ispitivanje penetrantima te su izrađeni i obrađeni makro izbrusci.

7.1. Materijali korišteni za izradu eksperimentalnog dijela rada

Cilj eksperimentalnog rada je bio napraviti raznorodni zavareni spoj, u ovom primjeru takozvani crno-bijeli spoj koji se sastoji od dva osnovna materijala; nelegiranog i visokolegiranog čelika.

7.1.1. Karakteristike osnovnog metala-nelegirani čelik

Nelegirani čelik korišten u zavarenom spoju je S235JR, standardni konstrukcijski čelik, čiji je kemijski sastav prikazan u tablici 8. [19]

Tablica 8. kemijski sastav čelika S235JR [19]

Kemijski element	C max, za debljinu (mm)			Mn max	P max	S max	N max	Cu max
	<16	16-40	>40					
%	0,19	0,19	0,23	1,5	0,045	0,045	0,014	0,6

7.1.2. Karakteristike osnovnog metala-visokolegiranog čelika

Visokolegiranog čelika korišten u zavarenom spoju je X5CrNi18-10, u tablici 9. je prikazan njegov kemijski sastav. [20]

Tablica 9. Kemijski sastav čelika X5CrNi18-10 [20]

Kemijski element	C max	Si max	Mn max	Ni	P max	S max	Cr max	N max
%	0,07	1	2	8-10,5	0,045	0,015	17,5-19,5	0,11

7.1.3. Dodatni materijal-metal zavora

Dodatni materijal korišten prilikom zavarivanja MIG postupkom je LINCOLN MIG 309 LSi , proizvođača Lincoln Electric, promjer dodatnog materijala iznosi 1,2 mm. U tablici 10. su prikazana mehanička svojstva koja garantira proizvođač da će se postići u metalu zavora. U tablici 11. Prikazan je kemijski sastav koji garantira proizvođač da se će se postići u metalu zavora. [21]

Tablica 10. Mehanička svojstva dodatnog materijala [21]

Promjer DM (mm)	Re N/mm ²	Rm N/mm ²	A %	Udarni rad loma J
1,2	436	582	37	87 (20 °C)

Tablica 11. Kemijski sastav dodatnog materijala [21]

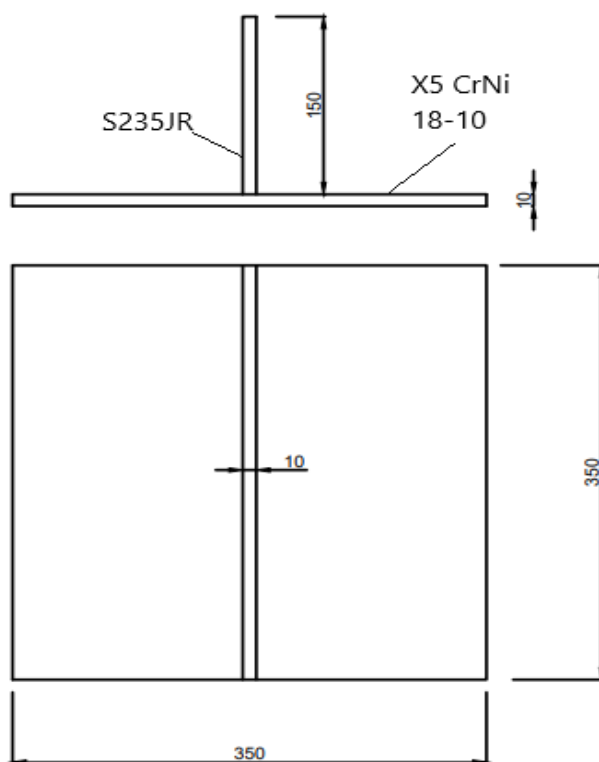
Kemijski element	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
Udio (%)	0,02	1.8	0,8	23.3	13,8	0,14

Lincoln MIG 309 LSi je visokoaustenitni dodatni materijal za MIG/MAG zavarivanje , nehrđajućih čelika s ugljičnim čelicima (raznorodni spoj), te ima veći udio Si za bolju sposobnost kvašenja. [21]

7.2. Priprema uzoraka za zavarivanje

Dimenzije čelika X5CrNi18-10 su 350x350x10, a čelika S235JR su 150x350x10. Izrezane su dvije ploče odgovarajućih dimenzija od čelika X5CrNi18-10, te dvije ploče odgovarajućih dimenzija od čelika S235JR. Dimenzije uzoraka su prikazane na slici 12.

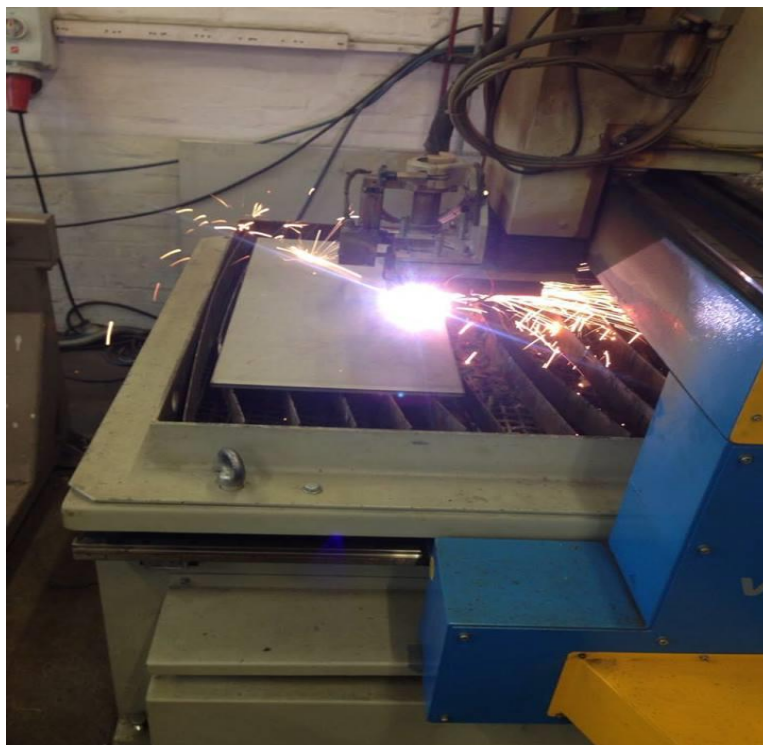
Na slici 13. je prikazan naziv i proizvođač uređaja za plazma rezanje, dok je na slici 14. prikazano rezanje.



Slika 12. dimenzije uzoraka

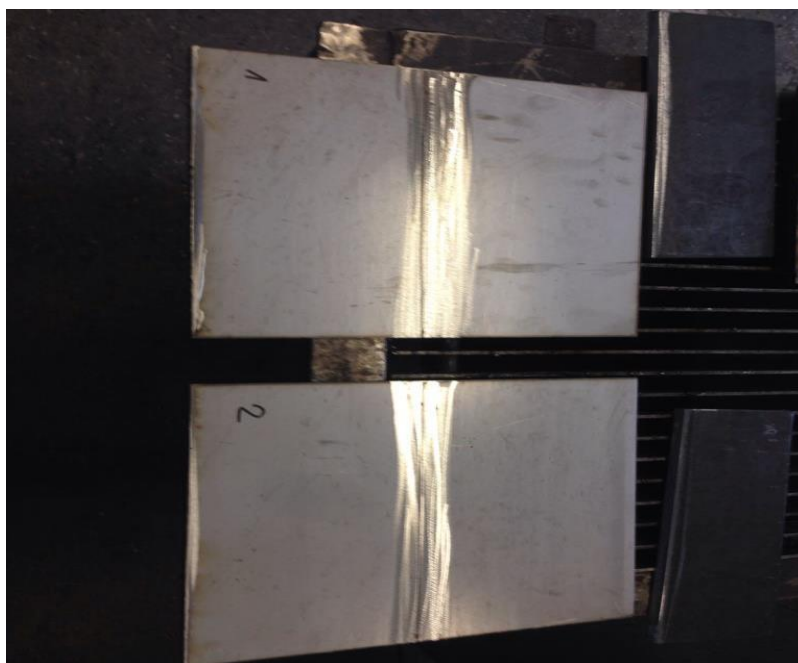


Slika 13. naziv i proizvođač uređaja za plazma rezanje



Slika 14. plazma rezanje

Nakon što su uzorci izrezani na odgovarajuće dimenzije izbrušeni su kako bi se uklonile nečistoće i srh nastali rezanjem, što je vrlo bitno kako nečistoće i hrđa ne bi ušle u metal zavora. Nakon čišćenja uzorci su pripojeni u T spoj kako bi ih se moglo namjestiti u položaj za zavarivanje. Na slici 15 su prikazani izbrušeni i očišćeni uzorci.



Slika 15. izbrušeni i očišćeni uzorci

7.3. Zavarivanje uzoraka MIG postupkom

Kako je već prije navedeno , zavarivanje je izvedeno MIG postupkom zavarivanja. Postupak je izveden automatski, izvor struje je proizvođača Daihen , model Welbee 500L. Uzorak 1 je zavaren u dva prolaza s manjim parametrima , dok je uzorak 2 zavaren tri prolaza s većim parametrima. U tablici 12. prikazana je specifikacija zavarivanja uzorka 1, dok je u tablici 13. prikazana specifikacija zavarivanja uzorka 2. Unos topline je ključan kod zavarivanja , izračunat je prema formuli:

$$Q = \frac{U \times I \times 60}{v_z \times 1000} \times \eta [\text{kJ/cm}]$$

U – Napon zavarivanje [V]

I – Jakost struje zavarivanja [A]

v_z – Brzina zavarivanja [cm/min.]

η – Stupanj iskorištenja i ovisi o postupku zavarivanja (za MIG 0,8)

Tablica 12. specifikacija zavarivanja uzorka 1

UZORAK 1		Specifikacija postupka zavarivanja Welding Procedure Specification (WPS) HRN EN ISO 15609-1:2008		Oznaka: Designation:																																														
Ime i prezime zavarivača: Welders name and surname:		Metoda pripreme rubova i čišćenje: Method of preparation and cleaning:		BRUŠENJE																																														
Postupak zavarivanja: Welding process: (HRN EN ISO 4063:2012)		135 (MIG)		Specifikacija osnovnog materijala: Parent material specification: X5CrNi18-10 S235																																														
Položaj zavarivanja: Welding position: (HRN EN ISO 6947:2012)		PB		Grupa osnovnog materijala: Parent material group: (HRI CEN ISO/TR 15608:2008)																																														
Vrsta spoja: Joint type:		KUTNI, T SPOJ		Debljina osnovnog materijala: Parent material thickness: 10 mm																																														
Priprema spoja: Weld preparation:		POLU V		Vanjski promjer (mm): Outside diameter (mm):																																														
Oblikovanje zavarenog spoja (HRN EN ISO 9692-1:2004) Joint design:				Redoslijed zavarivanja: Welding sequences:																																														
Pojedinosti zavarivanja – Welding details: <table border="1"> <thead> <tr> <th>Prolaz Run</th> <th>Postupak zavarivanja Welding process</th> <th>Promjer dodatnog materijala Size of filler material [mm]</th> <th>Struja Current [A]</th> <th>Napon Voltage [V]</th> <th>Vrsta struje / polaritet Type of current / polarity</th> <th>Brzina dodavanja žice Wire feed speed [m/min]</th> <th>Brzina zavarivanja Welding speed [cm/min]</th> <th>Unos topline Heat input [kJ/mm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1.</td> <td>135</td> <td>1,2</td> <td>225</td> <td>30</td> <td>DC +</td> <td>7,1</td> <td>25</td> <td>1,296</td> </tr> <tr> <td>2.</td> <td>135</td> <td>1,2</td> <td>275</td> <td>35</td> <td>DC +</td> <td>6,2</td> <td>25</td> <td>1,848</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						Prolaz Run	Postupak zavarivanja Welding process	Promjer dodatnog materijala Size of filler material [mm]	Struja Current [A]	Napon Voltage [V]	Vrsta struje / polaritet Type of current / polarity	Brzina dodavanja žice Wire feed speed [m/min]	Brzina zavarivanja Welding speed [cm/min]	Unos topline Heat input [kJ/mm]	1.	135	1,2	225	30	DC +	7,1	25	1,296	2.	135	1,2	275	35	DC +	6,2	25	1,848																		
Prolaz Run	Postupak zavarivanja Welding process	Promjer dodatnog materijala Size of filler material [mm]	Struja Current [A]	Napon Voltage [V]	Vrsta struje / polaritet Type of current / polarity	Brzina dodavanja žice Wire feed speed [m/min]	Brzina zavarivanja Welding speed [cm/min]	Unos topline Heat input [kJ/mm]																																										
1.	135	1,2	225	30	DC +	7,1	25	1,296																																										
2.	135	1,2	275	35	DC +	6,2	25	1,848																																										
Naziv dodatnog materijala i proizvođač: Filler material designation and producer:		MIG 309 Lsi, LINCOLN		Temperatura predgrijavanja: Preheat temperature:		min.	max.																																											
Klasifikacija dodatnog materijala: Filler material classification:		AWS A5,9		Meduslojna temperatura: Interpass temperature:		min.	max.																																											
Prema normi: According to the standard:		ISO 14342-A		Toplinska obrada nakon zavarivanja: Post-weld heat treatment:																																														
Promjer dodatnog materijala (mm): Filler material diameter (mm):		1,2		Trajanje, temperatura: Time, temperature:																																														
Vrsta i promjer volframove elektrode: Tungsten electrode type and diameter:				Brzina ugrijavanja i hlađenja: Heating and cooling rates:																																														
Kut postavljanja pištolja: Torch angle:		30		Uređaj za zavarivanje: Welding machine:																																														
Vrsta podloge: Backing type:				Pojedinosti impulsnog zavarivanja: Pulse welding details:																																														
Zaštitni plin Shielding gas	vrsta type	protok flow rate [l/min]																																																
	INOXLINE H5	18																																																
Korijenska zaštita Backing gas	vrsta type	protok flow rate [l/min]		Oscilacija, amplituda, frekvencija, vrijeme zadržavanja: Oscillation, amplitude, frequency, dwell time:																																														

Tablica 13. specifikacija zavarivanja uzorka 2

UZORAK 2		Specifikacija postupka zavarivanja Welding Procedure Specification (WPS) HRN EN ISO 15609-1:2008		Oznaka: Designation:				
Ime i prezime zavarivača: Welders name and surname:				Metoda pripreme rubova i čišćenje: Method of preparation and cleaning:				
Postupak zavarivanja: Welding process: (HRN EN ISO 4063:2012)		135 (MIG)		Specifikacija osnovnog materijala: Parent material specification:				
Položaj zavarivanja: Welding position: (HRN EN ISO 6947:2012)		PB		Grupa osnovnog materijala: Parent material group: (HRI CEN ISO/TR 15608:2008)				
Vrsta spoja: Joint type:		KUTNI, T SPOJ		Debljina osnovnog materijala: Parent material thickness:				
Priprema spoja: Weld preparation:		POLU V		Vanjski promjer (mm): Outside diameter (mm):				
Oblikovanje zavarenog spoja (HRN EN ISO 9692-1:2004) Joint design:				Redoslijed zavarivanja: Welding sequences:				
								
Pojedinosti zavarivanja – Welding details:								
Prola z Run	Postupak zavarivanja Welding process	Promjer dodatnog materijala Size of filler material [mm]	Struja Current [A]	Napon Voltage [V]	Vrsta struje / polaritet Type of current / polarity	Brzina dodavanja žice Wire feed speed [m/min]	Brzina zavarivanja Welding speed [cm/min]	Unos topline Heat input [kJ/mm]
1.	135	1,2	205	28	DC +	6,2	25	1,1021
2.	135	1,2	225	30	DC +	6,2	25	1,296
3.	135	1,2	275	35	DC +	6,2	25	1,848
Naziv dodatnog materijala i proizvođač: Filler material designation and producer:		MIG 309 Lsi, LINCOLN		Temperatura predgrijavanja: Preheat temperature:		min.		max.
Klasifikacija dodatnog materijala: Filler material classification:		AWS A5,9		Meduslojna temperatura: Interpass temperature:		min.		max.
Prema normi: According to the standard:		ISO 14342-A		Toplinska obrada nakon zavarivanja: Post-weld heat treatment:				
Promjer dodatnog materijala (mm): Filler material diameter (mm):		1,2		Trajanje, temperatura: Time, temperature:				
Vrsta i promjer volframove elektrode: Tungsten electrode type and diameter:				Brzina ugrijavanja i hlađenja: Heating and cooling rates:				
Kut postavljanja pištolja: Torch angle:		30		Uređaj za zavarivanje: Welding machine:				
Vrsta podloge: Backing type:				Pojedinosti impulsnog zavarivanja: Pulse welding details:				
Zaštitni plin Shielding gas	vrsta type	protok flow rate [l/min]						
	INOXLINE H5	18						
Korijenska zaštita Backing gas	vrsta type	protok flow rate [l/min]		Oscilacija, amplituda, frekvencija, vrijeme zadržavanjaOscillation,				

7.4. Vizualna kontrola uzoraka

Nakon što su se zavareni uzorci ohladili, zavareni spoj je očišćen četkom, kako je prikazano na slici 16. Potom je uslijedila vizualna kontrola. Zavareni uzorci su prikazani na slikama 17. i 18.



Slika 16. Čišćenje uzoraka četkom



Slika 17. Uzorak 1 nakon zavarivanja



Slika 18. Uzorak 2 nakon zavarivanja

Uslijed vizualne kontrole nisu uočene pukotine te je izgled zavaresnog spoja zadovoljavajuć.

7.5. Kontrola bez razaranja- ispitivanje penetrantima

Ova metoda kontrole zavarenih spojeva bez razaranja je vrlo česta u primjeni.

Na površinu zavarenog spoja se kao prvi korak nanosi čistač, naziva Elite Flaw-Findr BC1 (zeleni poklopac na slici 19.).



Slika 19. čistač, pentrant i razvijatelj

Nakon što je površina očišćena nanešen je crveni penetrant naziva Color PEN Tiede PEN PWL1 (bijeli poklopac na slici 19.), čija je zadaća prodiranje u eventualne pukotine u zavarenom spoju. Na slici 20. je prikazana površina uzoraka s nanesenim penetrantom.



Slika 20. površine zavarenih spojeva s nanesenim penetrantom

Nakon što je penetrant djelovao nanesen je razvijач NORD TEST Eindringprusystem Entwickler U89 (žuti poklopac na slici 19.) koji uzrokuje izvlačenje pentranta iz pukotine. Na slici 21. i 22. su prikazani uzorci kada se razvijач osušio i kada je bilo moguće obaviti kontrolu.





Slike 21. i 22. uzorci nakon što se razvijatelj osušio

Nakon što se razvijatelj osušio nije bilo vidljivo izbijanje penetranta na površinu, osim pri samom kraju zavarenog spoja.

Iz toga se dalo zaključiti da je zavaren spoj dobro izveden, te da nema pukotina i pora, a izbijanje penetranta na kraju zavarenog spoja znači da tamo postoje pukotine, što se može pripisati povećanju duljine električnog luka prilikom odvajanja pištolja od uzorka.

7.6. Makro izbrusci presjeka zavarenog spoja

Nakon završetka ispitivanja penetrantima, uzorci su očišćeni te su izrezani plazma rezačem i tračnom pilom kako bi se mogla obaviti analiza presjeka zavarenog spoja. Potom su ispolirani različitim vrstama brusnog papira. Brušenje se obavljalo ručno, prvo brusnim papirom hrapavosti #235, potom brušenje brusnim papirom hrapavosti #320, te redom hrapavosti #400, #600. Postupak je trajao 40 minuta po uzorku.

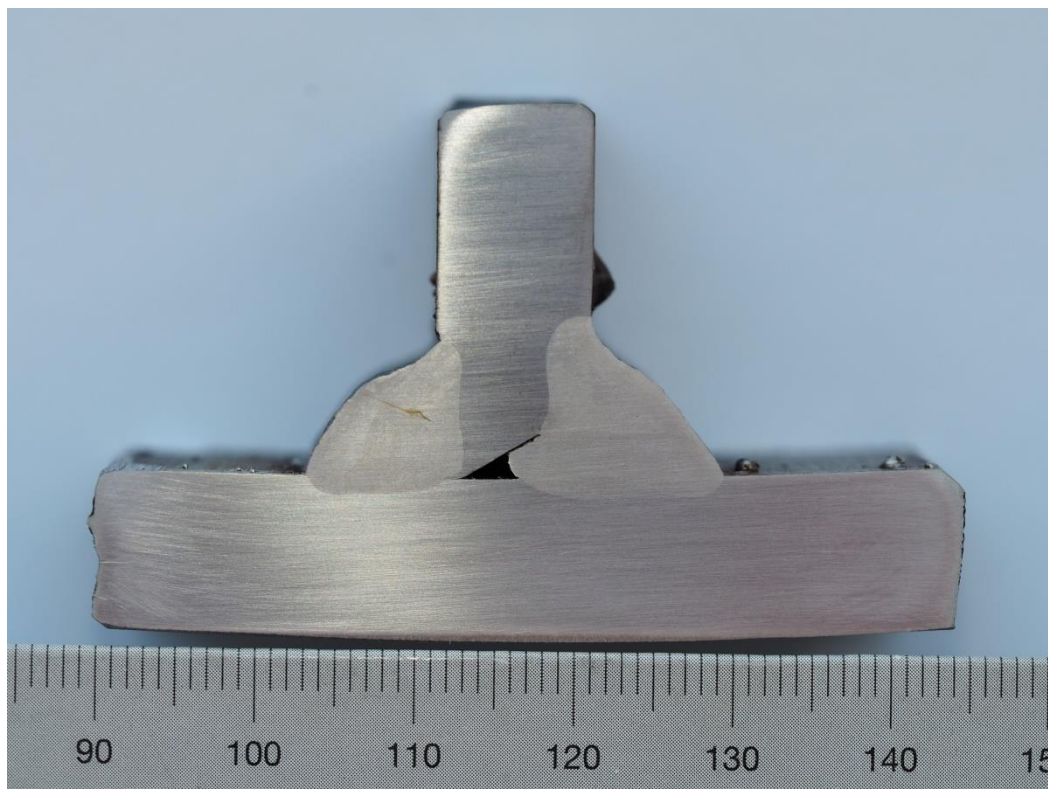
Slijedeći korak je bio podvrgnuti uzorke elektrolitičkom nagrivanju koje se vršilo u Laboratoriju za zaštitu materijala, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Nagrizanje je vršeno u otopini kromove (CrO_3) i dušične (HNO_3) kiseline u vodi, pri naponu 4V i jakosti struje 2A, u trajanju od 1. minute. Na slici 23. je prikazana oprema za elektrolitičko ispitivanje u Laboratoriju za zaštitu materijala.

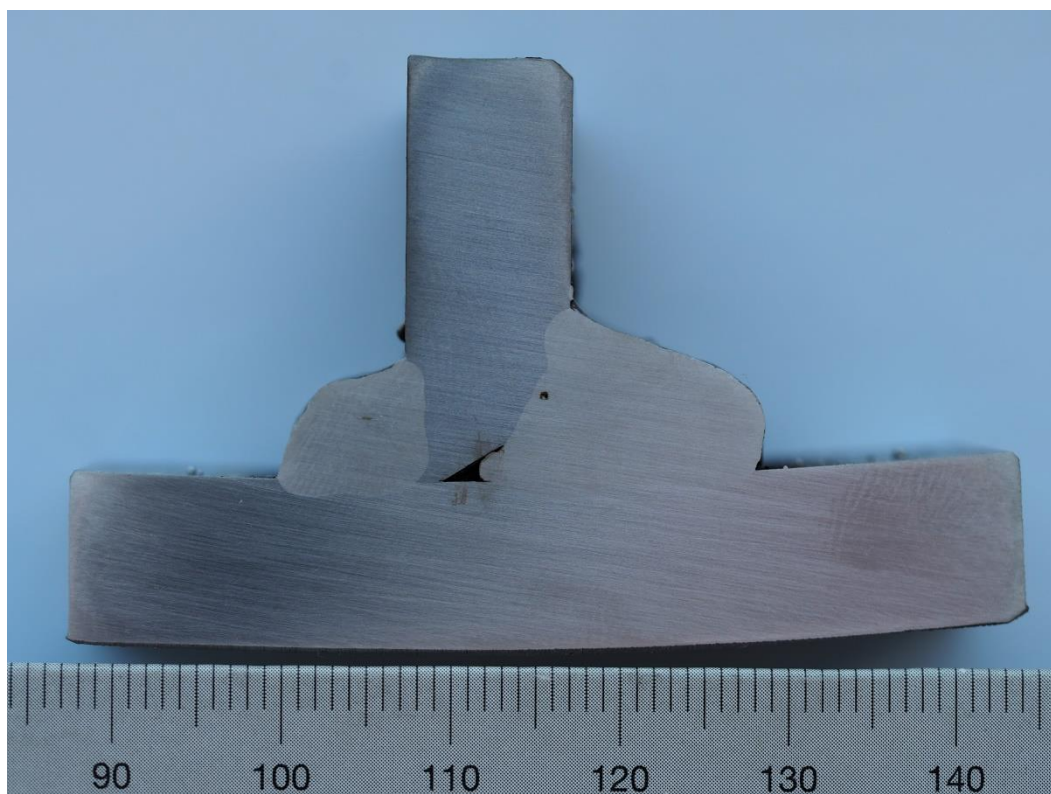


Slika 23. oprema za elektrolitičko ispitivanje

Na slici 24. je prikazan makro izbrusak presjeka zavarenog spoja uzorka 1, koji je izveden u dva prolaza. Na slici 25. je prikazan makro izbrusak presjeka zavarenog spoja uzorka 2, koji je izveden u 3 prolaza.



Slika 24. makro izbrusak presjeka zavarenog spoja, uzorak 1



Slika 25. makro izbrusak presjeka zavarenog spoja, uzorak 2

Prilikom analize makro izbrusaka na oba uzorka je zabilježeno da nije došlo do potpunog provarivanja korijena. Kod uzorka 2 prilikom 3. prolaza vidljiva je veća količina metala zavora. Na površini osnovnog metala X5CrNi18-10 na oba uzorka se primjećuje da je došlo do štrcanja.

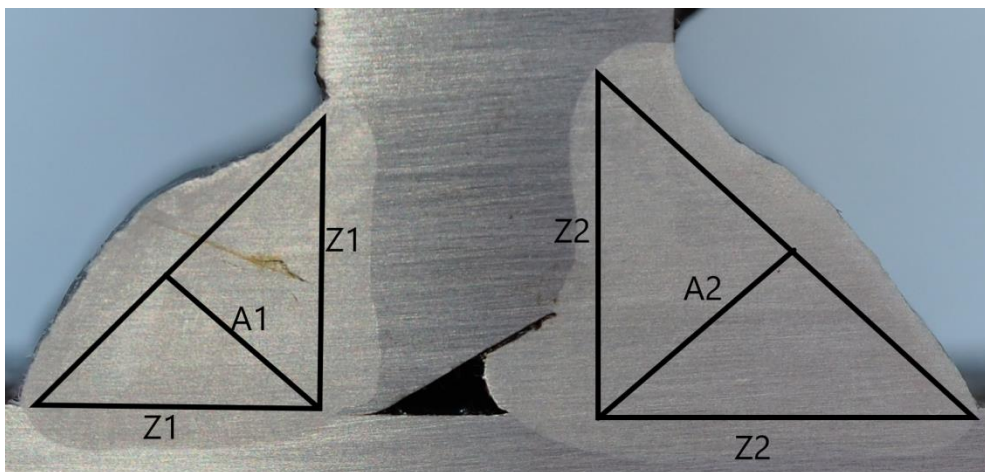
Razlozi nepotpunom provarivanju korijena su premali kut pripreme spoja koji je iznosio 30 stupnjeva, trebao je biti veći kako bi žica to jest dodatni materijal mogao prodrijeti do kraja korijena. Drugi je razlog premali kut postavljanja pištolja koji je vezan na kut pripreme. Veća količina depozita kod 3. prolaza kod drugog uzorka uzrokovana je premalom brzinom zavarivanja, koja je kod zadanih parametara prouzročila veću penetraciju.

Naštrcavanje je najvjerojatnije uzrokovano izborom i protokom zaštitnog plina, koji u sebi sadrži vodik, naime prilikom samog zavarivanja se čulo glasno pucanje.

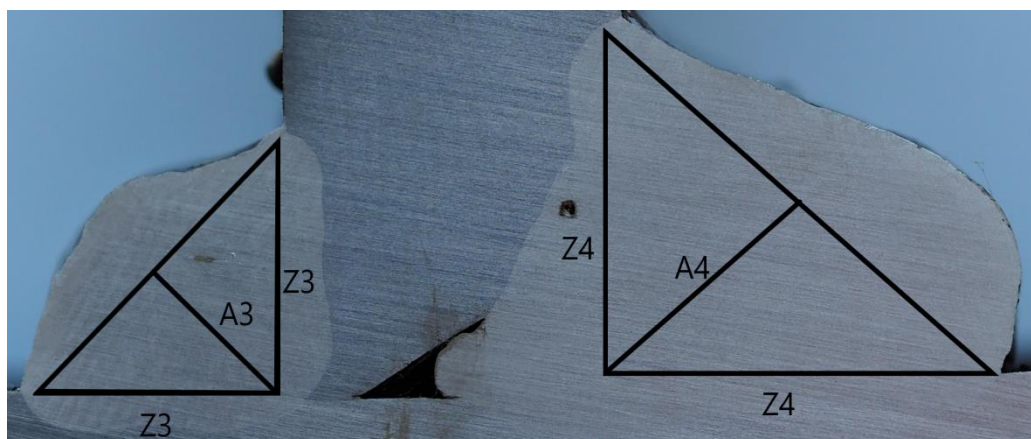
7.6.1. Geometrija zavora

Pri analizi geometrije zavora potrebno je odrediti bitne karakteristike: visinu, širinu i površinu poprečnog presjeka zavora. Analiza je rađena u programu imageJ, na makro izbruscima presjeka zavarenih spojeva 1 i 2 - koji su prikazani na prethodnim slikama.

Na slikama 26. i 27. su prikazane visine i širine zavora uzoraka 1 i 2 mjerenu u programu imageJ.

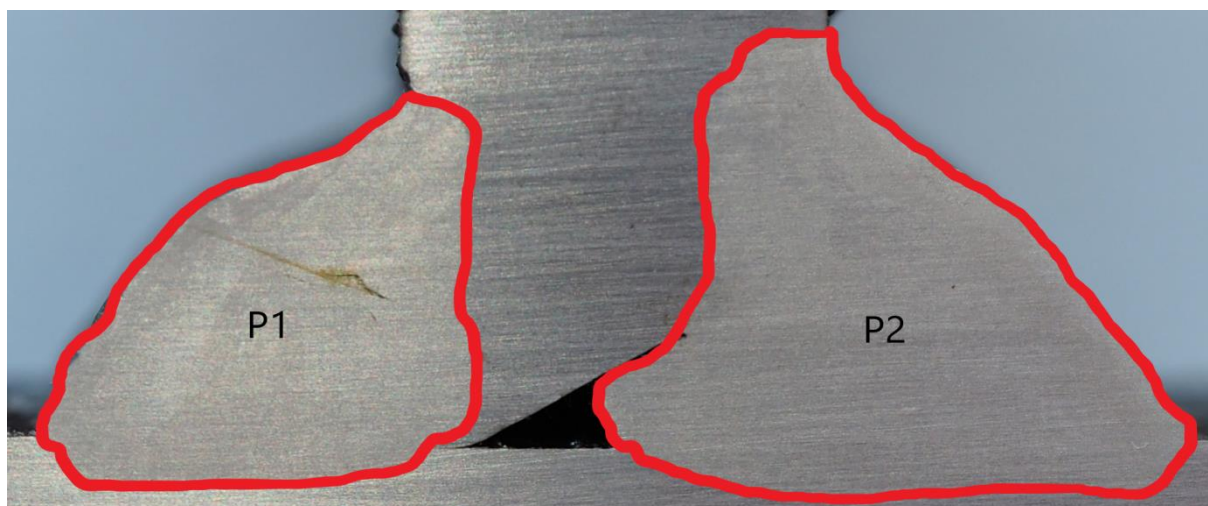


Slika 26. visine i širine zavora uzorka 1

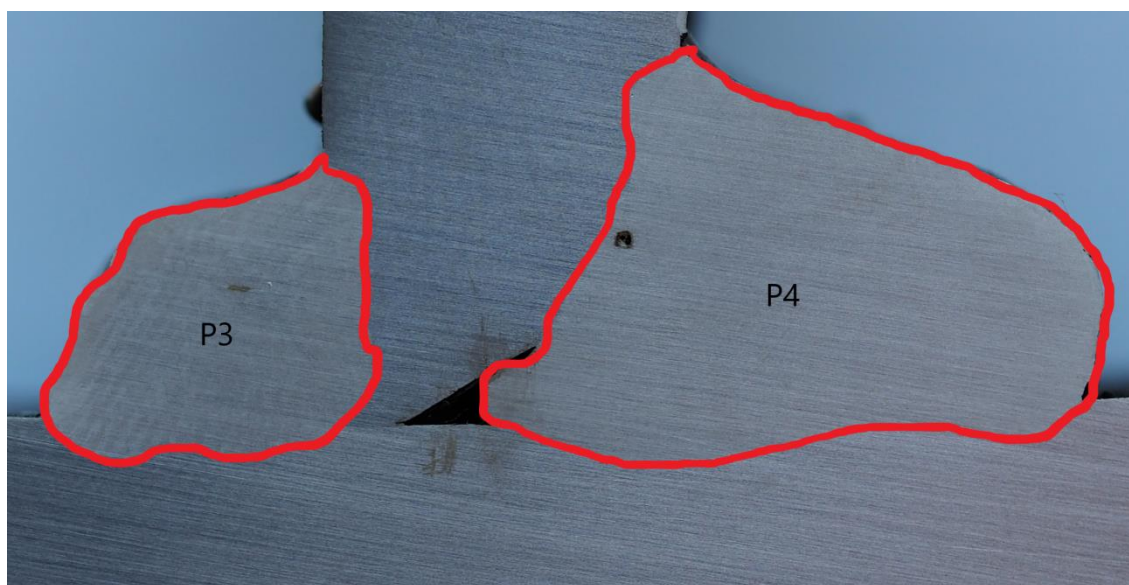


Slika 27. Visine i širine zavora uzorka 2

Na slikama 28. i 29. su prikazane površine zavora uzoraka 1 i 2



Slika 28. Površine zavora uzorka 1



Slika 29. Površine zavora uzorka 2

U tablicama 14. i 15. su prikazane vrijednosti visina, širina te površina zavara uzoraka 1 i 2.

Tablica 14. Izmjerene veličine uzorka 1

Z1(mm)	A1(mm)	P1(mm ²)	Z2(mm)	A2(mm)	P2(mm ²)
7,5	5,3	66,591	9,312	6,58	94,76

Tablica 15. Izmjerene veličine uzorka 2

Z3(mm)	A3(mm)	P3(mm ²)	Z4(mm)	A4(mm)	P4(mm ²)
7,08	5	55,159	10	7,07	121,41

8. ZAKLJUČAK

Zavareni spojevi od raznorodnih čelika su u sve većoj uporabi u različitim industrijskim granama. Kod složenijih konstrukcija postoje dijelovi koji su izloženi većim naprezanjima i jačem korozijskom djelovanju, te se oni izrađuju od visokolegiranih, nehrđajućih čelika. Gledajući s financijske strane, takvi čelici su skuplji od klasičnih ugljičnih čelika, te kada bi cijela konstrukcija bila izrađena od nehrđajućih čelika to ne bi bilo isplativo, stoga je uporaba zavarenih spojeva od različitih vrsta čelika danas uobičajena.

Kako je tehnologija zavarivanja raznorodnih čelika mnogo složenija od one zavarivanja čelika iste strukture, mnogo je zahtjevnije dobiti zadovoljavajuću kvalitetu zavarenog spoja. Potrebno je odabrati ispravne parametre zavarivanja kao i prikladan postupak zavarivanja.

Treba paziti na mnogo čimbenika kao što su stupanj protaljivanja o kojem ovisi kemijska jednakost zavarenog spoja, što je on veći kemijska nejednakost je veća te je veći udio osnovnog metala u metalu zavara. Treba težiti da je stupanj protaljivanja što manji.

Odabir dodatnog materijal također igra veliku ulogu, jer o njemu ovise svojstva zavara.

Schaefflerovim dijagramom, nakon što se izračunaju i unesu u dijagram Cr i Ni ekvivalenti koji ovise o kemijskim sastavima osnovnih i dodatnog materijala, moguće je odrediti strukturu metala zavara. Ona bi trebala biti u šafriranom području koje označava optimalan sastav zavarenog spoja.

Glavne poteškoće koje se javljaju prilikom zavarivanja raznorodnih čelika su difuzija i zaostala naprezanja.

Difuzija je kretanje atoma kroz materijal, najčešće ugljika, te za posljedicu ima stvaranje zone s više ugljika (pougljičenje, kod visokolegiranih čelika) i zone s manje ugljika (razugljičenje, kod nelegiranih čelika). Takve zone kemijske nejednakosti pogoduju nastanku interkristalne korozije i negativno utječu na mehanička svojstva zavarenog spoja.

U eksperimentalnom dijelu rada zavarena su dva uzorka iz raznorodnih čelika. Na oba uzorka došlo je do pojave pogrešaka u zavarenom spoju. Provarivanje korijena nije potpuno zbog neadekvatne pripreme, to jest premalog kuta pripreme koji je trebao biti veći. Da je bio veći kut dodatni materijal bi mogao prodrijeti do kraja korijena. Da je kut pripreme bio veći i kut pištolja bi se mogao bolje podesiti.

Primjećeno je naštrcavanje na osnovnom materijalu X5CrNi18-10, čemu je razlog zaštitni plin koji u sebi sadrži vodik, te je došlo do glasnog pucanja tijekom zavarivanja.

Na izvedenim zavarima provedene su vizualna i penetrantska kontrola, izvedeni zavari zadovoljili su zahtjeve vizualne kontrole, a kod penetrantske kontrole uočene su sitne pukotine na završecima zavara.

Geometrija zavara je zadovoljavajuća na oba uzorka, kod uzorka 2, prilikom 3. prolaza se može primjetiti veća količina depozita, zbog niže brzine zavarivanja, koja je pri odabranim parametrima prouzročila veću penetraciju.

9. LITERATURA

- [1] Lukačević, Z.: Zavarivanje, Strojarski fakultet Slavonski Brod, 1998
- [2] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011.
- [3] Bajs, M.: Završni rad: Primjena i specifičnosti modificiranih MAG postupaka, FSB Zagreb, 2013.
- [4] Prof.dr.sc. Ivan Juraga, Vinko Šimunović, dipl. ing., Ivan Stojanović, dipl. Ing: Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozivna postojanost, rukovanje, Pula 2007.
- [5] Prof.dr.sc. Juraga, I., et al.: Zavarivanje visokolegiranih čelika - zbornik radova
- [6] Austenitni nehrđajući čelici, https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1354629739-0-ssnc_7i8_pred_tekst.pdf
- [7] <http://www.aksteel.co.uk/1-products/1-stainless-sheet-and-strip/0-ferritic-stainless-%20steels.html>
- [8] Norma HRN EN 10088-1:2007; Nehrđajući čelici - 1. dio: Popis nehrđajućih čelika
- [9] Lippold, J.C., Kotecki, D.J.; Welding metallurgy and weldability of stainless steels; John Wiley and Sons, Inc., New Jersey, 2005
- [10] B. Mateša, I. Samardžić, M. Dunđer, Zavarljivost raznovrsnih čelika i primjena schaeffler-ovog dijagrama Slavonski brod, 2011.
- [11]. Mezga, V.: Problematika zavarivanja raznorodnih čelika, diplomski rad, Zagreb, 2009.
- [12] M. Bajs : Analiza nastanka toplih pukotina pri zavarivanju raznorodnih čelika, diplomski rad , Zagreb, 2015.
- [13]. Begović B.: Difuzioni procesi u zavarenim spojevima raznorodnih čelika u: Znanstveno - stručni časopis Zavarivanje 19, 1976.
- [14]. Ferit u zavaru, Schaefflerov dijagram, WRC 1992 Constitution dijagram“, s interneta, <http://www.treatrade.hr/pdf/DM/A6.pdf>
- [15] Hrivnak, I. "Theory of weldability of metals and alloys", Materials science monography 74, Elsevier, 1992.

- [16] Garašić I.: MIG/MAG zavarivanje, predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje
- [17] Jurica M.: Utjecaj zaštitnog plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenoga spoja čelika X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [18] Rudan, M.: Zavarivanje u zaštiti plina taljivom elektrodom (MIG/MAG) - Glavna obilježja i područja primjene, Društvo za tehniku zavarivanja Istra, Pula, 2005.
- [19] Norma EN 10025-2:2004: Kemijski sastav konstrukcijskih čelika
- [20] Norma EN 10088-2-2005: kemijski sastav Cr-Ni čelika
- [21] www.lincolnelectric.eu